Editora
Bernoulli
FÍSICA
Volume 06

Sumário - Física

Frente A

Frente B

Frente C

Frente D

Energia

O conceito de energia, fundamental na Ciência Moderna, é um dos conceitos científicos mais difundidos entre as pessoas. Todos possuem uma ideia, mesmo que vaga, do que seja energia. Neste módulo, estudaremos algumas formas de energia, como a energia cinética, a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica. Veremos, também, algumas formas de transformação e de transferência de energia que acontecem em sistemas físicos e estudaremos o Princípio da Conservação da Energia Mecânica. Finalizaremos o módulo apresentando o Princípio da Conservação da Energia, um dos mais importantes da Física.

Energia cinética (E_c)

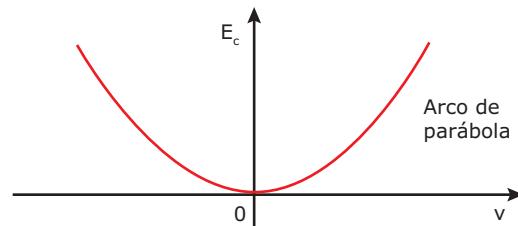
Todo corpo que se move possui uma energia associada ao seu movimento, pois, para colocar um corpo em seu estado de movimento, uma força foi exercida sobre ele, realizando trabalho e, consequentemente, transferindo-lhe energia. A energia associada ao movimento dos objetos é denominada energia cinética (E_c). Um veículo em movimento possui energia cinética e esta pode ser transformada em outra forma de energia quando, por exemplo, o veículo colide com um obstáculo qualquer.

Para determinar o modo como se calcula o valor da energia cinética de um corpo, considere um corpo de massa m que se move com velocidade inicial de módulo v_0, sob a ação de uma força resultante constante, de mesma direção que a velocidade, como mostra a figura a seguir:

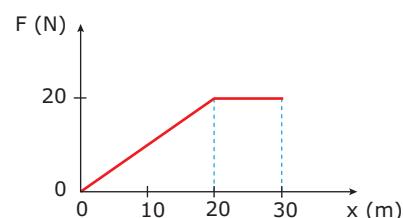
Essa força realizará um trabalho W sobre o corpo, transferindo-lhe energia e acelerando-o da velocidade de módulo v_0 até a velocidade de módulo v.

$$W = F_R.d = ma.d$$

Mas:

$$v^2 = v_0^2 + 2ad \Rightarrow ad = \frac{v^2 - v_0^2}{2}$$

$$\Rightarrow W = m\left(\frac{v^2 - v_0^2}{2}\right) = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$$

A expressão $\frac{mv^2}{2}$ é denominada energia cinética do corpo.

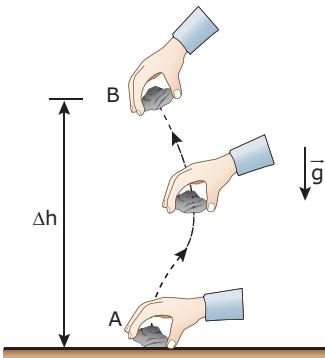
Logo:

$$W = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} \Rightarrow W = E_c - E_{c_0} \Rightarrow W = \Delta E_c$$

Esse resultado é conhecido como Teorema do Trabalho e da Energia Cinética. Apesar de termos realizado a demonstração para uma situação simples, é possível provar que a relação estabelecida entre o trabalho total realizado (W) e a variação da energia cinética (ΔE_c) é uma relação geral, válida para forças conservativas ou não, de módulo constante ou variável. O gráfico de energia cinética *versus* velocidade está esboçado na figura a seguir. Observe que a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade, $E_c \propto v^2$, e que E_c, portanto, é sempre positiva.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Um bloco de massa 0,5 kg está sujeito a uma força que varia com a posição de acordo com o gráfico a seguir.

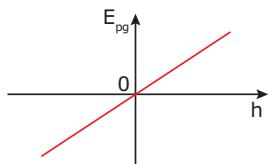
Se o bloco partiu do repouso em x = 0, qual será sua velocidade escalar, em m/s, quando x for igual a 30 m?

Resolução:

Sabemos que a área sob a curva do gráfico de força *versus* deslocamento nos fornece o valor do trabalho realizado por essa força. A área total sob a curva do gráfico é igual à soma da área do triângulo (200 J) e do retângulo (200 J). Ora, se o trabalho total realizado sobre o corpo foi de 400 J, isso significa que o corpo recebeu 400 J de energia. Como ele estava inicialmente em repouso ($E_c = 0$), o valor de sua energia cinética final será 400 J. Logo:

$$E_c = 400\text{ J} \Rightarrow 400 = \frac{0,5.v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{1\,600} \Rightarrow v = 40\text{ m/s}$$

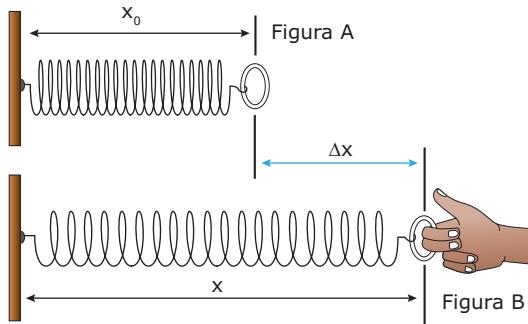
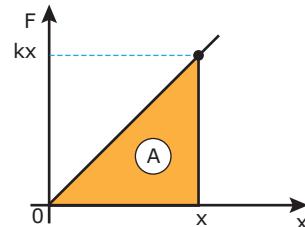
Energia potencial gravitacional (E_{pg})

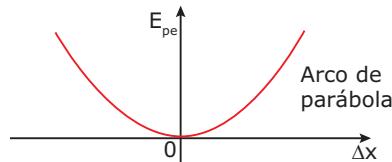
Outra forma de energia que comumente aparece em exercícios e em situações cotidianas é a energia potencial gravitacional. Ela está associada à posição que um corpo ocupa em um campo gravitacional, e sua variação entre dois pontos, A e B, pode ser definida pelo trabalho que a força peso executa no deslocamento entre esses dois pontos. Considerando o campo gravitacional constante entre A e B, teremos:

$$\Delta E_{pg} = F.d = mg(h_A - h_B) = mg\Delta h$$

Assim, tomando-se como referência um plano arbitrário h = 0, que comumente será o solo, onde a energia potencial gravitacional será zero, podemos calcular a energia potencial gravitacional de um ponto de altura h em relação a esse plano:

$$\Delta E_{pg} = E_{pgFinal} - E_{pgInicial} = E_{pgFinal} = mg(h - 0) = mgh$$

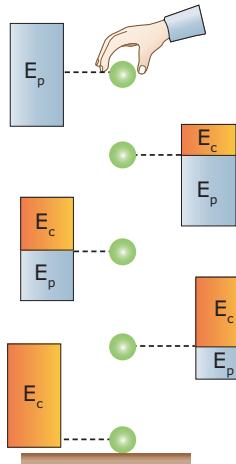
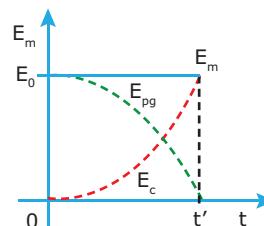
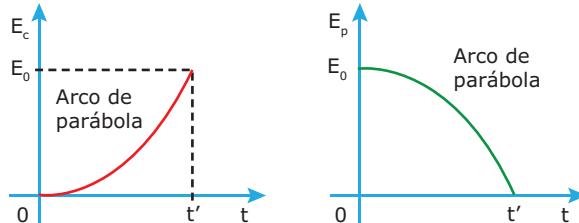
$$E_{pg} = mgh$$

O gráfico de energia potencial gravitacional *versus* altura está representado na figura a seguir. Observe que os valores negativos de E_{pg} indicam apenas que o objeto está em uma posição abaixo do referencial adotado.

Energia potencial elástica (E_{pe})

Ao puxarmos um arco (utilizado em arco e flecha), um elástico ou distendermos uma mola, estamos realizando trabalho sobre um sistema. Para que tais eventos ocorram, é necessário exercer uma força, à qual está atrelado um deslocamento.

Por exemplo, seja uma mola ideal, de constante elástica k, presa na parede em uma de suas extremidades e livre na outra. Seja x_0 o valor do comprimento inicial da mola. Uma pessoa puxa a extremidade livre da mola, alongando-a até o comprimento final x.

A deformação sofrida pela mola será, então, $\Delta x = x - x_0$. Nessa situação, a mola armazena uma energia potencial elástica (E_{pe}). Podemos determinar o valor da energia potencial elástica armazenada na mola se utilizarmos o gráfico de força elástica *versus* deformação. A área sob a curva do gráfico nos permite determinar o valor do trabalho realizado pelas forças externas para deformar a mola do ponto de alongamento nulo ao ponto de comprimento final. O valor desse trabalho é numericamente igual ao valor da energia potencial elástica.

$$E_{pe} = W_{F_e} \Rightarrow E_{pe} = \frac{kx.x}{2}$$

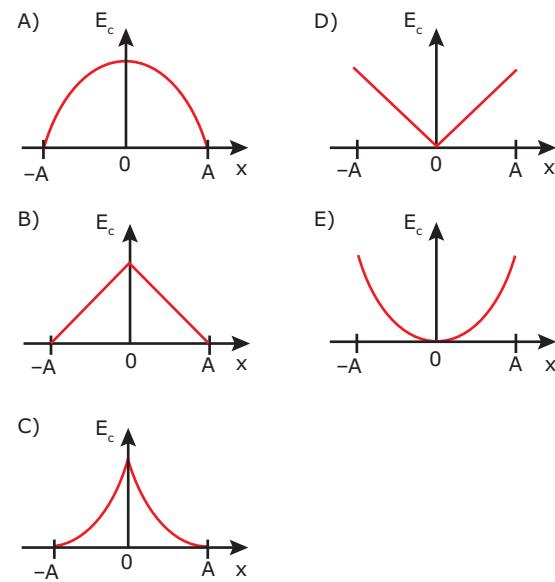
$$E_{pe} = \frac{kx^2}{2}$$

A energia potencial elástica é sempre positiva, apresentando um valor diretamente proporcional ao valor da constante elástica da mola (k) e sendo, também, diretamente proporcional ao quadrado do valor da deformação Δx da mola. O gráfico a seguir mostra o comportamento da energia potencial elástica, E_{pe}, em função da deformação da mola, Δx.

Os valores negativos para a deformação da mola indicam que ela está sendo comprimida, e os valores positivos mostram que a mola está sendo distendida.

Princípio da Conservação da Energia Mecânica (E_m)

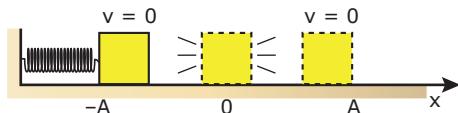
Denominamos de energia mecânica (E_m) de um sistema a soma das energias cinética e potencial que esse sistema possui em certa posição. Antes de enunciarmos o Princípio da Conservação da Energia Mecânica, apresentaremos o conceito de sistema conservativo. Nesse tipo de sistema, há presença apenas de forças conservativas, que, ao executarem trabalho sobre um corpo, não alteram a energia mecânica total do sistema. Por ora, é necessário você saber que as forças gravitacional (peso), elétrica e elástica são conservativas. Assim, o Princípio da Conservação da Energia Mecânica nos diz que, em sistemas conservativos, ou seja, em sistemas nos quais apenas a força peso, a força elástica ou a força elétrica realizam trabalho, a energia mecânica total do sistema conserva-se. Observe o exemplo a seguir, que ilustra esse princípio.

Consideremos uma esfera, solta de uma altura h, em queda livre, como representa a figura a seguir. Estão desenhadas cinco posições da esfera, nas quais representamos com retângulos os valores da energia cinética (E_c) e da energia potencial gravitacional (E_{pg}) em cada ponto. Observe que, no ponto mais alto, a esfera apresenta apenas energia potencial gravitacional. À medida que a esfera cai, o valor da E_{pg} diminui; a essa diminuição da energia potencial gravitacional corresponde um aumento da energia cinética da esfera. Quando a esfera chegar ao solo (h = 0), toda sua energia potencial gravitacional terá sido convertida em energia cinética.

Graficamente, podemos representar a situação da seguinte forma:

$$E_m = E_c + E_p$$

Caso existam forças dissipativas atuando sobre o sistema, o valor da energia mecânica não permanecerá constante. Na verdade, esse valor será reduzido, pois outras formas de energia não mecânicas, como o calor e o som, surgirão como consequência da dissipação da energia mecânica do sistema. Desse modo, o valor da energia mecânica final será menor que o valor da energia mecânica inicial, e a diferença entre esses valores refere-se justamente ao trabalho realizado pelas forças dissipativas. Matematicamente, podemos escrever que:

$$W_{\text{forças dissipativas}} = E_{mf} - E_{m0}$$

Observação: As equações da Cinemática nos permitem resolver muitos problemas. Entretanto, sua aplicação está limitada às questões em que o valor da aceleração é constante. Dessa forma, utilizando o Princípio da Conservação da Energia Mecânica, problemas cuja solução não poderia ser encontrada pelo estudo dos movimentos uniformemente acelerados podem agora ser resolvidos.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

02. (UFPE) Uma massa m está presa na extremidade de uma mola de massa desprezível e constante elástica conhecida. A massa oscila em torno da sua posição de equilíbrio x = 0, com amplitude A, sobre uma superfície horizontal sem atrito. Qual dos gráficos a seguir representa melhor a energia cinética E_c, em função da posição x da massa?

Resolução:

A situação descrita anteriormente pode ser representada pela figura que se segue:

Como temos a presença apenas de forças conservativas, a energia mecânica total se conserva. Como o movimento se dá apenas no plano horizontal: $E_m = E_c + E_{pe}$.

Nos pontos de amplitude máxima (+A e –A), o valor da velocidade e, consequentemente, o da energia cinética são nulos, já que há mudança no sentido da velocidade. No ponto x = 0, $E_{pe} = 0$, já que a mola não está distendida, e $E_c = E_m$, tendo assim a energia cinética, e consequentemente a velocidade, seu valor máximo.

Ainda por conservação da energia, $E_c = E_m - E_{pe} = E_m - kx^2/2$. Como E_{Mm} e k são constantes positivas, o gráfico tem a forma de uma parábola de concavidade voltada para baixo (a = –k/2 < 0). Assim, o gráfico que melhor representa a energia cinética em função da posição x da massa é o da alternativa A.

03. (UNESP) Um bloco de massa m desliza sem atrito sobre a superfície indicada na figura a seguir.

Se g é a aceleração da gravidade, a velocidade mínima v que o bloco deve ter para alcançar a altura h é

A) $2\sqrt{gh}$.
B) $\sqrt{2gh}$.
C) $\frac{\sqrt{gh}}{2}$.
D) $\sqrt{\frac{gh}{2}}$.
E) $2\sqrt{2gh}$.

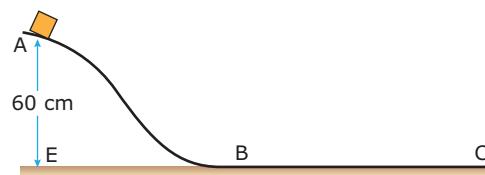
Resolução:

O enunciado afirma que o sistema é conservativo, pois não apresenta forças de atrito. Inicialmente, o bloco apresenta energia cinética dada por $E_c = \frac{mv^2}{2}$. Ao subir a rampa, o valor da energia cinética diminui, e a energia potencial gravitacional do bloco aumenta da mesma quantidade. Deseja-se determinar a velocidade mínima inicial para que o bloco chegue ao topo da rampa. Logo, ele pode chegar lá com velocidade zero, isto é, com toda sua energia cinética convertida em energia potencial gravitacional. Então:

$$E_c = E_{pg} \Rightarrow mv^2/2 = mgh \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

Princípio da Conservação da Energia

As ciências da natureza estruturam-se sobre princípios, afirmativas que não podem ser comprovadas diretamente, mas que um grande número de fenômenos levou os estudiosos a considerá-las como "verdades" científicas. Um desses princípios é o Princípio da Conservação da Energia, em sua forma geral, e não apenas em sua forma mecânica. É interessante ressaltar que existem várias formas do Princípio da Conservação da Energia, há as que se aplicam a sistemas menores e fechados, e há o Princípio da Conservação da Energia em sua forma geral, que diz que a energia do Universo é constante.

O Princípio da Conservação da Energia comprova que a energia que recebemos do Sol não apenas se transforma em inúmeras outras formas de energia (como eólica, fóssil, térmica, etc.), mas também se conserva, isto é, não é "gasta" ou "consumida", e sim apenas convertida em outras formas de energia. Não importa o quão complexo é um sistema e nem por quanto tempo o observamos, a energia total em um sistema fechado sempre se conserva.

A energia elétrica que utilizamos no Brasil provém, em sua maioria, de usinas hidroelétricas. Quando utilizamos uma queda-d'água para gerar energia nessas usinas, estamos apenas aproveitando parte da energia potencial gravitacional da água para transformá-la em energia elétrica, que, por sua vez, será convertida em luz, som, calor, etc.

Creative Commons

EXERCÍCIO RESOLVIDO

04. (UFMG) Um bloco de massa 0,20 kg desce deslizando sobre a superfície mostrada na figura.

No ponto A, a 60 cm acima do plano horizontal EBC, o bloco tem uma velocidade de 2,0 m/s e, ao passar pelo ponto B, sua velocidade é de 3,0 m/s. Considere $g = 10\ m/s^2$.

A) Mostrar, usando conceitos relacionados à energia, que, entre os pontos A e B, existe atrito entre o bloco e a superfície.

B) Determinar o trabalho realizado pela força de atrito que atua no bloco entre os pontos A e B.

C) Determinar o valor do coeficiente de atrito entre a superfície horizontal e o bloco, sabendo-se que este chega ao repouso no ponto C, distante 90 cm de B.

Resolução:

A) Se existe atrito na rampa, então a energia mecânica tem seu valor reduzido. Vamos determinar o valor da energia mecânica nos pontos A e B e comparar seus valores:

$$E_{mA} = E_c + E_{pg} = \frac{mv^2}{2} + mgh = \frac{0,2.2^2}{2} + 0,2.10.0,6$$

$$\Rightarrow E_{mA} = 0,4\ J + 1,2\ J = 1,6\ J$$

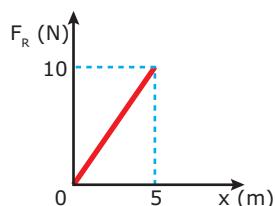
$$E_{mB} = E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{0,2.3^2}{2} = 0,9\ J$$

Tendo em vista que a energia mecânica do bloco não se conserva, conclui-se que há atrito entre os pontos A e B da superfície.

B) O trabalho realizado pela força de atrito é dado pela diferença entre os valores da energia mecânica do bloco nos pontos A e B. Logo, o trabalho realizado pela força de atrito entre os pontos A e B é dado por:

$$W_{at} = E_m - E_{m0} = -0,7\ J$$

C) O trabalho realizado pela força de atrito, que é a força resultante, sobre o bloco entre os pontos B e C é igual à variação da energia cinética do bloco entre os pontos B e C. Logo:

$$W_{at} = \Delta E_{CBC}$$

$$\Rightarrow -N.\mu.(0,90) = 0 - 0,9$$

$$\Rightarrow -0,20.10.\mu(0,90) = -0,9$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{1}{2} = 0,5$$

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (FEI-SP) O gráfico a seguir é uma reta e representa a variação da força resultante que atua em um corpo de 1,2 kg em função do deslocamento. Sabe-se que a velocidade na posição x = 2 m é de 4 m/s. Qual é a velocidade do corpo na posição x = 4 m?

A) 10 m/s
B) 6 m/s
C) 8 m/s
D) 16 m/s
E) 9,6 m/s

02. (PUC Minas) Uma bola é arremessada verticalmente para baixo, do alto de um edifício. No ponto de lançamento, a bola possui uma energia potencial E_P = 10 J e uma energia cinética E_c = 5,0 J. A resistência do ar no local da experiência não pode ser desprezada. Na metade da altura, a energia potencial é

A) igual a 15 J.
B) menor que 5,0 J.
C) igual a 5,0 J.
D) igual a 10 J.
E) maior que 15 J.

03. (UEL-PR) A figura 1 representa um sistema composto de três esferas de mesma massa unidas por três molas idênticas. O sistema é posto a oscilar, deslocando-se entre as posições indicadas nas figuras 2 e 3.

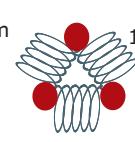
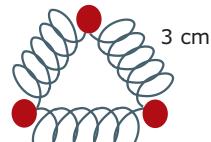
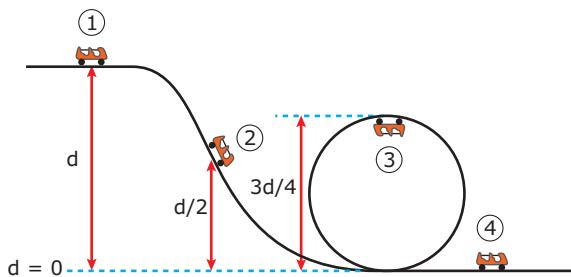



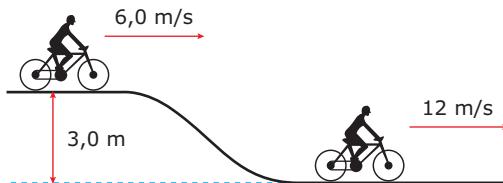
Figura 1 Figura 2 Figura 3

Pode-se dizer que a energia potencial elástica máxima do sistema ocorre

A) somente na posição da figura 1.
B) somente na posição da figura 2.
C) somente na posição da figura 3.
D) nas posições das figuras 1 e 2.
E) nas posições das figuras 2 e 3.

04. (FCMMG) Uma montanha-russa tem a forma da figura a seguir. Um carrinho desliza em seus trilhos, considerados com atrito desprezível, passando pelos diversos pontos 1, 2, 3 e 4, cujas alturas são, respectivamente, d, d/2, 3d/4 e 0. O carrinho tem massa m e passa pelo ponto 1 com energia cinética igual a mgd/2.

Três alunos fizeram as seguintes afirmações sobre essa situação:

Josefina – A energia cinética do carrinho no ponto 2 é igual a mgd.

Gabriel – A energia potencial gravitacional do carrinho no ponto 3 é igual à sua energia cinética.

Rosana – A energia mecânica do carrinho no ponto 4 é igual a 3mgd/2.

Pode-se afirmar que

A) apenas Gabriel fez afirmação correta.
B) apenas Josefina fez afirmação correta.
C) apenas Josefina e Rosana fizeram afirmações corretas.
D) os três alunos fizeram afirmações corretas.

05. (FCMMG) Um ciclista se move a 6,0 m/s quando, então, desce uma rua cujo desnível é de 3,0 m, chegando à sua base com 12 m/s, como mostra a figura.

Com relação a essa situação, pode-se afirmar que

A) o trabalho realizado pelos atritos é igual à perda de energia potencial do conjunto bicicleta-ciclista.
B) a variação da energia cinética do conjunto bicicleta-ciclista é apenas devido ao desnível da rua.
C) durante a descida, o ciclista pedalou, acrescendo energia cinética ao conjunto bicicleta-ciclista.
D) os dados da situação mostram que o ciclista não pedalou durante a descida, pois sua energia mecânica foi conservada.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (FUVEST-SP) Um ciclista desce uma ladeira, com forte vento contrário ao movimento. Pedalando vigorosamente, ele consegue manter a velocidade constante. Pode-se, então, afirmar que a sua

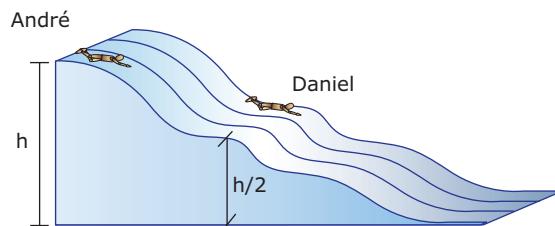
A) energia cinética está aumentando.
B) energia cinética está diminuindo.
C) energia potencial gravitacional está aumentando.
D) energia potencial gravitacional está diminuindo.
E) energia potencial gravitacional é constante.

02. (PUC-Campinas-SP) Um corpo de massa 12 kg está submetido a diversas forças, cuja resultante $\vec{F}$ é constante. A velocidade do corpo num ponto M é de 4,0 m/s e num outro ponto N é de 7,0 m/s. O trabalho realizado pela força $\vec{F}$ no deslocamento de M para N é, em joules, de

A) 33. C) 99. E) 396.
B) 36. D) 198.

03. (UFSC–2007) O bloco representado na figura a seguir desce a partir do repouso, do ponto A, sobre o caminho que apresenta atrito entre as superfícies de contato. A linha horizontal AB passa pelos pontos A e B.

Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

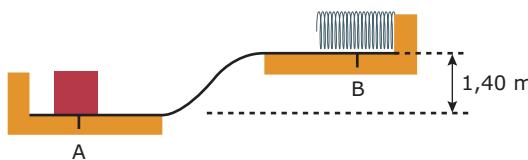
01. O bloco certamente atingirá o ponto B.
02. A força de atrito realiza trabalho negativo durante todo o percurso e faz diminuir a energia mecânica do sistema.
04. Tanto a força peso como a força normal realizam trabalho.
08. A energia potencial gravitacional permanece constante em todo o percurso do bloco.
16. A energia cinética do bloco não se conserva durante o movimento.
32. O bloco sempre descerá com velocidade constante, pois está submetido a forças constantes.
64. A Segunda Lei de Newton não pode ser aplicada ao movimento desse bloco, pois existem forças dissipativas atuando durante o movimento.

Soma ( )

04. (UFTM-MG) Um projétil é lançado obliquamente para cima. Considere que o projétil retorna ao nível de onde foi lançado. Desprezando a resistência do ar, pode-se afirmar que

A) o sistema projétil + Terra não é conservativo.
B) a variação da energia cinética do projétil é positiva.
C) a energia cinética do projétil é nula no ponto mais alto da trajetória.
D) a energia mecânica do sistema projétil + Terra varia durante o movimento.
E) o trabalho realizado pela força gravitacional no deslocamento total do projétil é nulo.

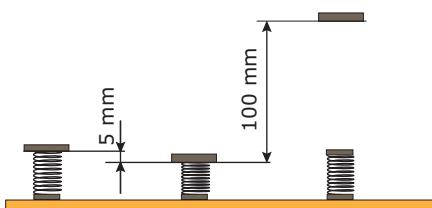
05. (UEL-PR) Uma partícula de massa 500 g, em movimento retilíneo, aumenta sua velocidade desde 6,0 m/s até 10 m/s num percurso de 8,0 m. A força resultante sobre a partícula tem módulo, em newtons,

A) 16. C) 6. E) 2.
B) 8. D) 4.

06. (UFMG) Daniel e André, seu irmão, estão parados em um tobogã, nas posições mostradas na figura:

Daniel tem o dobro do peso de André, e a altura em que ele está, em relação ao solo, corresponde à metade da altura em que está seu irmão. Em um certo instante, os dois começam a escorregar pelo tobogã. Despreze as forças de atrito.

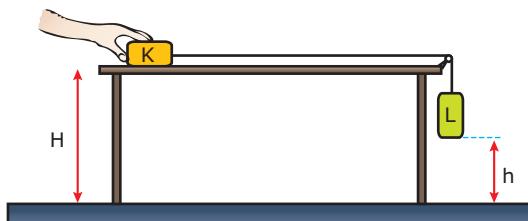
É **CORRETO** afirmar que, nessa situação, ao atingirem o nível do solo, André e Daniel terão

A) energias cinéticas diferentes e módulos de velocidades diferentes.
B) energias cinéticas iguais e módulos de velocidades iguais.
C) energias cinéticas diferentes e módulos de velocidades iguais.
D) energias cinéticas iguais e módulos de velocidades diferentes.

07. (EFOA-MG) Um bloco de massa 2,0 kg sobe a rampa ilustrada na figura adiante, comprimindo uma mola de constante elástica k = 200 N/m até parar em B.

Sabe-se que a velocidade do bloco em A era 8,0 m/s e que não houve quaisquer efeitos dissipativos no trecho entre os pontos A e B.

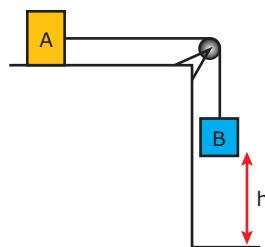
Considerando-se a aceleração da gravidade local igual a 10 m/s^2, pode-se afirmar que a compressão **MÁXIMA** da mola terá sido

A) 0,60 m.
B) 0,65 m.
C) 0,50 m.
D) 0,80 m.
E) 0,85 m.

08. (UFJF-MG) Um garoto brinca com uma mola espiral. Ele coloca a mola em pé numa mesa e apoia um pequeno disco de plástico em cima da mola. Segurando a borda do disco, ele comprime a mola, encurtando-a 5 mm. Após o garoto soltar os dedos, a mola projeta o disco 100 mm para cima (contando da altura de lançamento; veja a figura). Quanto subiria o disco se o garoto comprimisse a mola por 10 mm? Suponha que toda energia potencial da compressão da mola seja transferida para o disco e que a mola seja ideal. Marque a resposta **CERTA**.

A) 400 mm
B) 200 mm
C) 100 mm
D) 80 mm
E) 90 mm

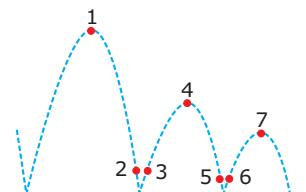
09. (Unimontes-MG–2008) Um atleta de massa 87,5 kg, praticante de *bungee jumping* (veja as figuras), pula de uma estrutura de 187 m de altura, preso a uma corda, cujo comprimento natural (comparável ao comprimento de equilíbrio de uma mola) é 72 m e cujo coeficiente de elasticidade é k = 35 N/m (comparável ao coeficiente de uma mola). Considerando que o rapaz se move em queda livre enquanto a corda não começa a ser esticada, num local onde g = 10 m/s^2, a **MENOR** distância que ele chegará do solo é

A) 50 m.
B) 30 m.
C) 40 m.
D) 25 m.

10. (UFMG) Em um laboratório de Física, Agostinho realiza o experimento representado, esquematicamente, na figura adiante.

Agostinho segura o bloco K sobre uma mesa sem atrito. Esse bloco está ligado por um fio a um outro bloco L, que está sustentado por esse fio. Em um certo momento, Agostinho solta o bloco, e os blocos começam a se movimentar. O bloco L atinge o solo antes que o bloco K chegue à extremidade da mesa. Despreze as forças de atrito.

Os blocos K e L são idênticos, e cada um tem massa m. A altura da mesa é H, e o bloco L, inicialmente, está a uma altura h do solo. A aceleração da gravidade é g.

Nessas condições, imediatamente antes de o bloco L atingir o solo, a energia cinética do conjunto dos dois blocos é

A) mg(H – h).
B) mgh.
C) mgH.
D) mg(H + h).

11. (EFOA-MG) Os blocos A e B, representados na figura a seguir, estão inicialmente em repouso, têm massas M e m, respectivamente, e estão ligados por um fio inextensível de massa desprezível.

Sabendo-se que não existe atrito entre o bloco A e a mesa, que a massa da polia e a resistência do ar são desprezíveis e que a aceleração da gravidade no local é g, é **CORRETO** afirmar que, após o bloco B ter caído de uma altura h, a energia cinética do bloco A é expressa por

A) $\frac{1}{2}Mgh$.

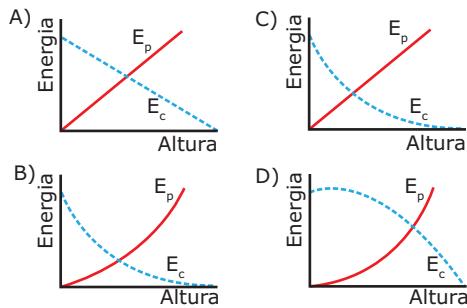
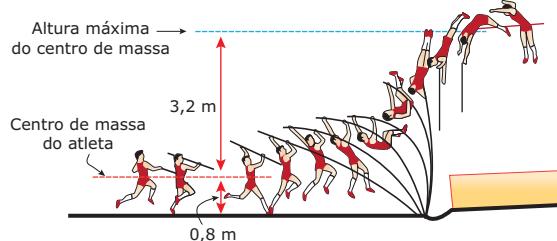
B) $\frac{1}{2}\frac{gMmh}{(M+m)}$.

C) $\frac{2gMmh}{(M+m)}$.

D) $\frac{gMmh}{(M+m)}$.

E) Mgh.

FÍSICA

12. (PUC Minas) A figura a seguir representa a trajetória de uma bola de tênis quicando em um chão de cimento. Os pontos 1, 4 e 7 são os pontos mais altos de cada trecho da trajetória. O ponto 2 está na mesma altura que o ponto 3, e o ponto 5 está na mesma altura que o ponto 6. Considere a bola como uma partícula, e considere desprezível o atrito com o ar.

Sobre essa situação, é **INCORRETO** afirmar que

A) a energia mecânica em 1 é maior que a energia mecânica em 4.

B) a energia potencial gravitacional em 1 é maior que a energia potencial gravitacional em 4.

C) a energia cinética em 3 é igual à energia cinética em 2.

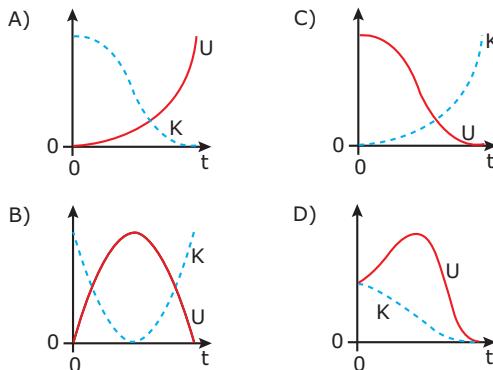
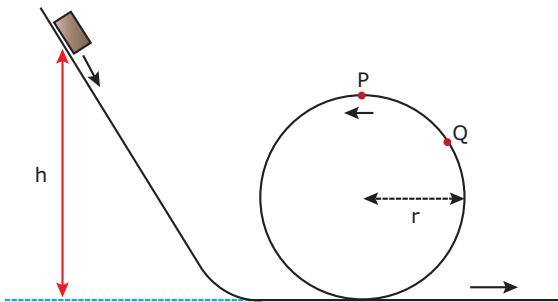
D) a energia mecânica em 4 é igual à energia mecânica em 3.

E) a energia mecânica em 7 é menor que a energia mecânica em 5.

13. (UFC) Quando uma bola cai de uma certa altura, sua energia potencial E_p vai se transformando em energia cinética E_c. Considere $E_p = 0$ o nível do solo, onde a altura é nula. Despreze a resistência do ar.

O gráfico que **MELHOR** representa as energias potencial E_p (linha contínua) e cinética E_c (linha tracejada), em função da altura da bola, é

14. (FUVEST-SP–2008)

No "salto com vara", um atleta corre segurando uma vara e, com perícia e treino, consegue projetar seu corpo por cima de uma barra. Para uma estimativa da altura alcançada nesses saltos, é possível considerar que a vara sirva apenas para converter o movimento horizontal do atleta (corrida) em movimento vertical, sem perdas ou acréscimos de energia. Na análise de um desses saltos, foi obtida a sequência de imagens reproduzida anteriormente.

Nesse caso, é possível estimar que a velocidade **MÁXIMA** atingida pelo atleta, antes do salto, foi de, aproximadamente,

(Desconsidere os efeitos do trabalho muscular após o início do salto.)

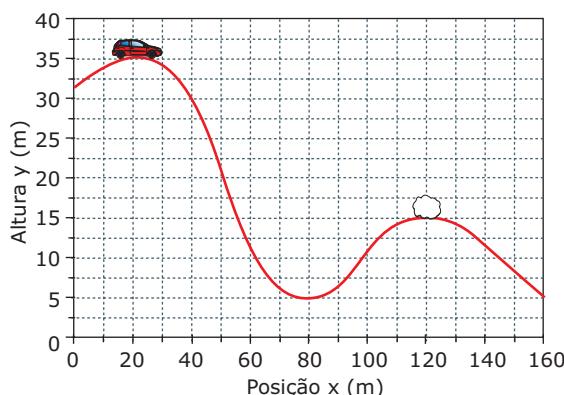
A) 4 m/s.

B) 6 m/s.

C) 7 m/s.

D) 8 m/s.

E) 9 m/s.

15. (UFV-MG–2009) Uma pedra é lançada verticalmente para cima. Desprezando-se a resistência do ar, o gráfico que representa **CORRETAMENTE** os comportamentos da energia potencial gravitacional U e da energia cinética K da pedra, em função do tempo t, é

16. (UFJF-MG–2008) Um carrinho de massa m desliza ao longo de um circuito de uma montanha-russa, contendo um *loop* de raio r. Tratando o carrinho como uma massa puntiforme, e desprezando todo tipo de atrito,

A) **CALCULE** a velocidade mínima no ponto P para o carrinho não perder contato com a pista nesse ponto.

B) **CALCULE** o valor mínimo da altura h, onde o carrinho é solto do repouso, para percorrer o circuito, sem perder contato com a pista no ponto P.

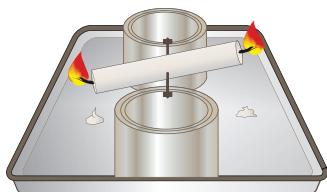
C) Supondo-se que a altura de onde ele é solto do repouso é suficiente para fazer uma volta completa no *loop*, **FAÇA** um diagrama das forças que atuam sobre o carrinho, quando ele passa pelo ponto Q, identificando cada uma das forças.

17. (Unicamp-SP) Um famoso cientista, Dr. Vest B. Lando, dirige calmamente o seu automóvel de massa m = 1 000 kg pela estrada cujo perfil está mostrado na figura a seguir. Na posição x = 20 m, quando sua velocidade vale 72 km/h (20 m/s), ele percebe uma pedra ocupando toda a estrada na posição x = 120 m (ver figura). Se o Dr. Vest B. Lando não acelerar ou acionar os freios, o automóvel (devido aos atritos internos e externos) chega na posição da pedra com metade da energia cinética que teria caso não houvesse qualquer dissipação de energia.

A) Com qual velocidade o automóvel se chocará com a pedra se o Dr. Vest B. Lando não acelerar ou acionar os freios?

B) Que energia tem de ser dissipada com os freios acionados para que o automóvel pare antes da pedra?

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2005) Observe a situação descrita na tirinha a seguir.

CARUSO, Francisco; DAOU, Luisa. *Tirinhas de Física*, v. 2, CBPF, Rio de Janeiro, 2000.

Assim que o menino lança a flecha, há transformação de um tipo de energia em outra. A transformação, nesse caso, é de energia

A) potencial elástica em energia gravitacional.

B) gravitacional em energia potencial.

C) potencial elástica em energia cinética.

D) cinética em energia potencial elástica.

E) gravitacional em energia cinética.

02. (Enem–2006) A figura a seguir ilustra uma gangorra de brinquedo feita com uma vela. A vela é acesa nas duas extremidades e, inicialmente, deixa-se uma das extremidades mais baixa que a outra. A combustão da parafina da extremidade mais baixa provoca a fusão. A parafina da extremidade mais baixa da vela pinga mais rapidamente que na outra extremidade. O pingar da parafina fundida resulta na diminuição da massa da vela na extremidade mais baixa, o que ocasiona a inversão das posições. Assim, enquanto a vela queima, oscilam as duas extremidades.

Nesse brinquedo, observa-se a seguinte sequência de transformações de energia:

A) Energia resultante de processo químico → energia potencial gravitacional → energia cinética

B) Energia potencial gravitacional → energia elástica → energia cinética

C) Energia cinética → energia resultante de processo químico → energia potencial gravitacional

D) Energia mecânica → energia luminosa → energia potencial gravitacional

E) Energia resultante do processo químico → energia luminosa → energia cinética

03. (Enem–2008) *A energia geotérmica tem sua origem no núcleo derretido da Terra, onde as temperaturas atingem 4 000 ºC. Essa energia é primeiramente produzida pela decomposição de materiais radiativos dentro do planeta. Em fontes geotérmicas, a água, aprisionada em um reservatório subterrâneo, é aquecida pelas rochas ao redor e fica submetida a altas pressões, podendo atingir temperaturas de até 370 ºC sem entrar em ebulição. Ao ser liberada na superfície, à pressão ambiente, ela se vaporiza e se resfria, formando fontes ou gêiseres. O vapor de poços geotérmicos é separado da água e é utilizado no funcionamento de turbinas para gerar eletricidade. A água quente pode ser utilizada para aquecimento direto ou em usinas de dessalinização.*

HINRICHS, Roger A.;KLEINBACH, Merlin. *Energia e meio ambiente*. Ed. ABDR (Adaptação).

Depreende-se das informações anteriores que as usinas geotérmicas

A) utilizam a mesma fonte primária de energia que as usinas nucleares, sendo, portanto, semelhantes os riscos decorrentes de ambas.

B) funcionam com base na conversão de energia potencial gravitacional em energia térmica.

C) podem aproveitar a energia química transformada em térmica no processo de dessalinização.

D) assemelham-se às usinas nucleares no que diz respeito à conversão de energia térmica em cinética e, depois, em elétrica.

E) transformam inicialmente a energia solar em energia cinética e, depois, em energia térmica.

04. (Enem–2006) Na avaliação da eficiência de usinas quanto à produção e aos impactos ambientais, utilizam-se vários critérios, tais como: razão entre produção efetiva anual de energia elétrica e potência instalada ou razão entre potência instalada e área inundada pelo reservatório. No quadro seguinte, esses parâmetros são aplicados às duas maiores hidrelétricas do mundo: Itaipu, no Brasil, e Três Gargantas, na China.

PARÂMETROS	ITAIPU	TRÊS GARGANTAS
Potência instalada	12 600 MW	18 200 MW
Produção efetiva de energia elétrica	93 bilhões de kWh/ano	84 bilhões de kWh/ano
Área inundada pelo reservatório	1 400 km^2	1 000 Km^2

Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br>.

Com base nessas informações, avalie as afirmativas que se seguem.

I. A energia elétrica gerada anualmente e a capacidade nominal máxima de geração da hidrelétrica de Itaipu são maiores que as da hidrelétrica de Três Gargantas.

II. Itaipu é mais eficiente que Três Gargantas no uso da potência instalada na produção de energia elétrica.

III. A razão entre potência instalada e área inundada pelo reservatório é mais favorável na hidrelétrica Três Gargantas do que em Itaipu.

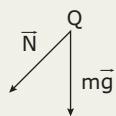
É correto apenas o que se afirma em

A) I.

B) II.

C) III.

D) I e III.

E) II e III.

GABARITO

Fixação

01. B

02. C

03. E

04. D

05. C

Propostos

01. D

02. D

03. Soma = 18

04. E

05. E

06. D

07. A

08. A

09. D

10. B

11. D

12. C

13. A

14. D

15. B

16. A) $v_{mín.} = \sqrt{rg}$

B) $h_{mín.} = \frac{5}{2}r$

C)

17. A) v = 20 m/s

B) E = 2,0 x 10^5 J

Seção Enem

01. C

02. A

03. D

04. E

FÍSICA

MÓDULO 12 FRENTE A

Impulso e quantidade de movimento

O estudo dos diferentes movimentos observados na natureza passou a ser sistematizado no século XVII. Os filósofos da natureza acreditavam que o movimento total do Universo, ou melhor, a quantidade de movimento total do Universo deveria permanecer constante, uma vez que, para eles, o Universo era uma obra divina. Esses filósofos debatiam sobre que grandeza física deveria representar a quantidade de movimento de um corpo: sua velocidade, o produto da massa pela velocidade ou outra expressão qualquer.

Neste módulo, estudaremos duas grandezas vetoriais: a quantidade de movimento ($\vec{Q}$) e o impulso ($\vec{I}$). A análise dessas grandezas revelou uma nova abordagem dos princípios de conservação, até então desconhecida. O Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento mostrou-se muito útil para o estudo de colisões e de explosões, situações em que forças intensas e de curto período de duração atuam sobre os corpos.

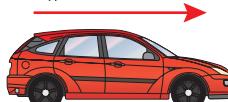
Quantidade de movimento ($\vec{Q}$)

A quantidade de movimento de uma partícula de massa m é definida pelo produto $m.\vec{v}$, em que $\vec{v}$ é a velocidade da partícula. O vetor quantidade de movimento é representado por $\vec{Q}$. Logo, $\vec{Q} = m.\vec{v}$, de modo que o vetor quantidade de movimento tem as seguintes características:

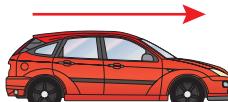
Módulo: $|\vec{Q}| = m|\vec{v}|$
Direção: A direção de $\vec{Q}$ é a mesma de $\vec{v}$.
Sentido: O sentido de $\vec{Q}$ é o mesmo de $\vec{v}$.

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de quantidade de movimento é o $kg.\frac{m}{s}$.

Quantidade de movimento de um sistema

As ciências da natureza, entre elas a Física, apesar de reconhecerem a conexão entre vários elementos existentes na natureza, muitas vezes realizam uma separação desses elementos para melhor compreendê-los. Denominamos de sistema isolado uma parte ou uma região do Universo que, por suas condições particulares, pode ser considerada isolada do resto do Universo, para efeitos de estudo. Ao trabalharmos com a quantidade de movimento de um sistema, é muito importante delimitarmos quais são os corpos que fazem parte desse sistema, uma vez que isso definirá quais são as forças internas e externas que agem sobre ele.

Consideremos o sistema constituído por dois carros, A e B, de massas iguais, m = 1 000 kg, ambos se movendo com velocidade de 10 m/s (36 km/h). O módulo da quantidade de movimento de cada carro será igual a 1,0 x 10^4 kg.m/s; porém, a quantidade de movimento total dos dois carros, A e B, dependerá da direção e do sentido em que eles estiverem se movendo. A figura a seguir mostra dois resultados possíveis, caso eles estejam movendo-se no mesmo sentido ou em sentidos opostos.

Se os carros possuem a mesma direção e o mesmo sentido:

$$\vec{Q}_{Total} = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B \Rightarrow |\vec{Q}_{Total}| = 2,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$$

Se os carros possuem a mesma direção e sentidos opostos:

$$\vec{Q}_{Total} = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B \Rightarrow |\vec{Q}_{Total}| = 0$$

$\vec{Q}_A$ = 1,0 x 10^4 kg.m/s
$\vec{Q}_B$ = −1,0 x 10^4 kg.m/s
A
B

De maneira geral, para um sistema de n partículas, a quantidade de movimento total do sistema, $\vec{Q}$, será dada por:

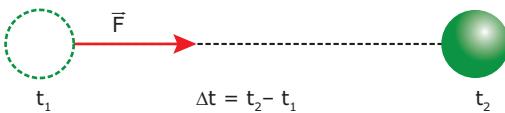
$$\vec{Q} = \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2 + \vec{Q}_3 + ... + \vec{Q}_n$$

Para alterar a velocidade de uma partícula e, consequentemente, alterar sua quantidade de movimento, é necessária a aplicação de uma força. Assim, ao exercermos uma força sobre um corpo, podemos alterar o módulo de sua velocidade, o que alterará, além de sua quantidade de movimento, o valor de sua energia cinética. Podemos também alterar somente a direção ou o sentido de sua velocidade, de forma que sua energia cinética permaneça constante, como mostrado no exemplo a seguir.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma bola de massa 2 kg, que se move com velocidade constante de módulo igual a 3 m/s, choca-se com um muro e inverte o sentido de seu movimento, passando a mover-se com velocidade constante de módulo igual a –3 m/s. Determinar os módulos da quantidade de movimento e da energia cinética da bola antes e depois da colisão com o muro.

Resolução:
Usando as equações que expressam a quantidade de movimento e a energia cinética de um corpo, obtemos:

	Velocidade	Quant. de movimento	Energia cinética
Antes da colisão	+3 m/s	+6 kg.m/s	9 J
Após a colisão	–3 m/s	–6 kg.m/s	9 J

Observe que a energia cinética é uma grandeza escalar. Portanto, a inversão do movimento não alterou seu valor. Entretanto, a quantidade de movimento é uma grandeza vetorial. Dessa forma, a inversão do sentido do movimento alterou o sentido do vetor quantidade de movimento $\vec{Q}$.

Impulso $\vec{I}$ de uma força constante

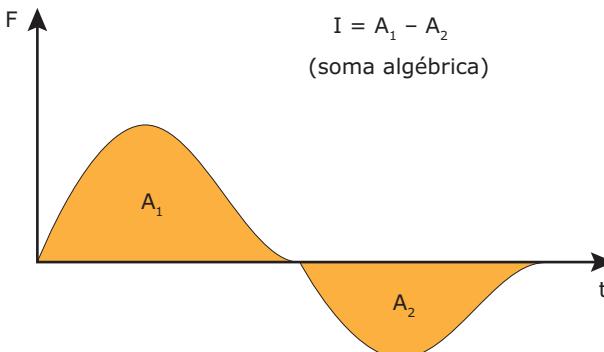
Forças de grande intensidade, ainda que atuem por curtos intervalos de tempo, provocam grandes variações na quantidade de movimento dos corpos. Por exemplo, as forças que atuam em um carro durante um teste de colisão (*crash test*), apesar de atuarem sobre o veículo durante um pequeno intervalo de tempo, provocam uma grande variação na quantidade de movimento do carro, pois o vetor quantidade de movimento do veículo, que possuía módulo não nulo, torna-se nulo em uma pequena fração de segundo.

Considere uma força constante $\vec{F}$ atuando sobre um corpo durante um intervalo de tempo Δt.

O impulso $\vec{I}$ da força $\vec{F}$ é a grandeza física que mede o efeito de uma força $\vec{F}$ atuando sobre um corpo durante um intervalo de tempo Δt. O impulso $\vec{I}$ é definido como o produto da força $\vec{F}$ pelo intervalo de tempo Δt.

$$\vec{I} = \vec{F}.\Delta t$$

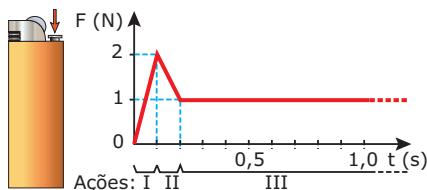
Como Δt é uma grandeza escalar positiva, o vetor impulso possui as seguintes características:

Módulo: $|\vec{I}| = |\vec{F}|\Delta t$

Direção: A direção de $\vec{I}$ é a mesma de $\vec{F}$.

Sentido: O sentido de $\vec{I}$ é o mesmo de $\vec{F}$.

A unidade do impulso no SI é o kg.m/s. Como 1 N é igual a 1 kg.m/s^2, outra unidade do impulso é o N.s.

Método gráfico para se calcular o impulso

A expressão $\vec{I} = \vec{F}.\Delta t$, assim como a expressão usada para se calcular o valor do trabalho realizado por uma força (W = F.cos θ.d), somente pode ser utilizada se o módulo da força $\vec{F}$ for constante, o que não acontece em muitas ocasiões. Quando o módulo da força $\vec{F}$ for variável, podemos calcular o módulo do impulso $\vec{I}$ por meio da área sob a curva do gráfico de força *versus* tempo. Nesse caso, o cálculo deve levar em consideração o sinal da força, ou seja, áreas acima do eixo do tempo têm sinal positivo, e áreas abaixo do eixo do tempo têm sinal negativo no cálculo algébrico do impulso.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. (FGV-SP) Ao acender um isqueiro, uma pessoa faz com que seu dedão exerça uma força variável direcionada a três ações distintas:

I. É preciso vencer a força de atrito estático entre o rolete e a pedra contra ele pressionada.

II. Superado o atrito estático, a força aplicada não mais necessita ser de tamanho tão elevado e, portanto, pode ser reduzida. Ainda em contato com o rolete, o dedão desce e começa a abaixar a alavanca que libera o gás.

III. Uma vez livre do rolete e com a alavanca que libera o gás completamente pressionada, a força é mantida constante durante o tempo que for necessário manter a chama acesa.

O gráfico mostra, hipoteticamente, a intensidade da força exercida por uma pessoa no ato de acender um isqueiro, para cada ação descrita.

Nessas condições, o impulso da força exercida pelo dedão sobre o rolete do isqueiro e sobre a alavanca que libera o gás até seu completo abaixamento tem intensidade, em N.s, de

A) 0,05. B) 0,10. C) 0,15. D) 0,20. E) 0,25.

Resolução:

Interpretando o enunciado, vemos que o impulso da força exercida pelo dedão deve ser calculado somente para as ações I e II, ou seja, para os trechos I e II do gráfico. Não podemos utilizar a equação $\vec{I} = \vec{F}.\Delta t$ para calcular o impulso, pois o módulo da força não é constante. Logo, devemos determinar o módulo do impulso pelo método gráfico.

A área sob a curva do gráfico nos trechos I e II pode ser calculada dividindo-se a figura em 2 triângulos e 1 retângulo, ou seja:

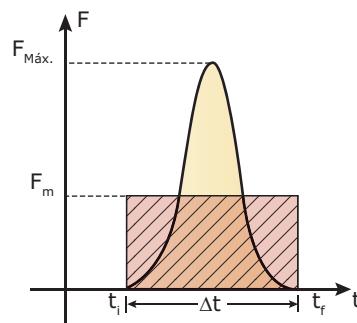
$$I = A \Rightarrow I + \frac{0,1.2}{2} + \frac{0,1.1}{2} + 1.0,1$$

$$\Rightarrow I = 0,1 + 0,05 + 0,1$$

$$\Rightarrow I = 0,25 \text{ N.s}$$

Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento

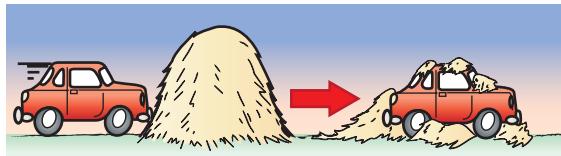
A força resultante $\vec{F}_R$ que atua sobre um corpo de massa m se relaciona com a aceleração $\vec{a}$ adquirida por esse corpo por meio da 2ª Lei de Newton: $\vec{F}_R = m\vec{a}$. Portanto, sendo $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$, temos a equação do Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento:

$$\vec{F}_R = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F}_R\Delta t = m\Delta\vec{v} \Rightarrow \vec{I}_R = m\vec{v} - m\vec{v}_0$$

$$\vec{I}_R = \Delta\vec{Q}$$

De acordo com o resultado anterior, a variação da quantidade de movimento de um corpo em um certo intervalo de tempo é igual ao impulso da força resultante que atua sobre ele nesse mesmo intervalo de tempo. Como mostrado anteriormente, as unidades N.s (impulso) e kg.m/s (quantidade de movimento) são equivalentes.

A relação entre o impulso e a quantidade de movimento permite analisar várias situações em que a quantidade de movimento de um corpo varia. Vamos nos deter a três situações: (1) a quantidade de movimento aumenta; (2) a quantidade de movimento diminui em um intervalo de tempo longo; (3) a quantidade de movimento diminui em um curto intervalo de tempo. Após a análise dessas três situações, estudaremos outras em que a quantidade de movimento de um corpo se conserva.

1. Aumentando a quantidade de movimento

Para que a quantidade de movimento de um corpo aumente, a força resultante que atua sobre ele deve ser não nula e deve possuir uma componente que atue sobre o corpo na mesma direção e no mesmo sentido do vetor quantidade de movimento desse. Um jogador de futebol, ao cobrar uma falta, tenta exercer sobre a bola uma força com a maior intensidade que ele puder e durante o maior tempo possível, pois, nessa situação, o aumento da quantidade de movimento (e a direção correta) podem significar um gol. As forças de grande intensidade que atuam em intervalos de tempo muito curtos são chamadas de forças impulsivas. O gráfico a seguir representa a intensidade de uma força impulsiva e, ao mesmo tempo, o valor da força média (F_m) que produziria a mesma variação da quantidade de movimento.

Representação gráfica de uma força impulsiva. A área hachurada possui o mesmo valor da área sob a curva de intensidade da força impulsiva.

Suponhamos que o gráfico anterior represente a intensidade da força que o pé do jogador exerce sobre a bola. O pé do jogador não exercerá força sobre a bola enquanto não houver contato entre o pé e a bola. Logo, durante esse intervalo de tempo, a força F será nula. No instante t_i, o pé do jogador entra em contato com a bola, e o módulo da força que o pé exerce sobre ela aumenta rapidamente até atingir um valor máximo. A partir desse instante, o contato do pé do jogador com a bola diminui e, consequentemente, o módulo da força exercida por ele também. A partir do instante t_f, não haverá mais contato entre o pé e a bola. Logo, a força impulsiva será nula. Quando nos referirmos a forças impulsivas, estaremos nos referindo aos valores médios dessas forças.

2. Diminuindo a quantidade de movimento num grande intervalo de tempo

Se você estivesse dirigindo um carro que por algum motivo perdeu os freios, e tivesse de escolher entre jogá-lo em uma parede ou em um monte de capim, temos certeza de que o seu bom senso lhe diria para jogar o carro sobre o monte de capim. Em qualquer que fosse o local escolhido, a parede ou o monte de capim, a variação da quantidade de movimento do

carro seria, rigorosamente, a mesma, de um valor $Q_0 = m.v$ até um valor $Q = 0$. Porém, na colisão com o monte de capim, o tempo no qual ocorre a variação da quantidade de movimento é maior e, portanto, o módulo da força impulsiva média é menor.

Lembre-se de que $\vec{I}_R = \Delta\vec{Q}$. Logo, $\vec{F}_R\Delta t = m\Delta\vec{v}$, ou seja, um tempo mais longo é "compensado" por uma força de menor intensidade.

Esse fato é conhecido e utilizado por pessoas que saltam, sejam paraquedistas, atletas ou bailarinos. Para reduzir a intensidade da força que os músculos devem exercer, essas pessoas procuram aumentar ao máximo o intervalo de tempo no qual a sua velocidade está variando, flexionando bem as pernas.

3. Diminuindo a quantidade de movimento num pequeno intervalo de tempo

Quando os engenheiros tentam nos convencer de que as grossas chapas de ferro, de que eram feitos os carros antigos, são menos seguras que as atuais chapas mais finas, eles estão plenamente conscientes da física que está por trás dessa "aparente" contradição. As chapas mais finas vão se deformar mais, aumentando o tempo de duração do impacto, no caso de uma colisão. Por esse motivo, elas são mais seguras. Em uma colisão de menor duração, o módulo da força impulsiva média é o maior; portanto, as consequências da ação dessa força podem ser mais desastrosas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

03. A maior fabricante de cintos de segurança no Brasil simula as colisões que podem ocorrer com um motorista colocando um boneco (de massa 80 kg) em um carro de teste. O carro é lançado em uma barreira fixa a 50 km/h e para em menos de 0,5 s.

Insurance Institute for Highway Safety

Disponível em: <http://press.iihs.org/2008/022608>. Acesso em: 22 fev. 2011

A) Calcular o módulo da quantidade de movimento inicial e final do boneco.

B) Qual o módulo da variação da quantidade de movimento do boneco?

C) Qual o módulo do impulso exercido sobre o boneco?

D) Os cintos são projetados para suportar uma força de até 3 000 kgf. Sabendo que o intervalo de tempo de uma colisão desse tipo é de 0,15 s, determinar se o cinto irá suportar ou não esse impacto.

Resolução:

A) Para se calcular o módulo da quantidade de movimento inicial, Q_0, e final, Q, basta utilizar a equação $Q = mv$, com os valores da velocidade inicial (50 km/h ≈ 14 m/s) e da velocidade final (0 km/h):

$Q_i = mv_0 = 80$ kg.14 m/s $= 1,1 \times 10^3$ kg.m/s

$Q_f = mv = 80$ kg.0 m/s $= 0$ kg.m/s

B) A variação da quantidade de movimento do boneco é dada por $\Delta Q = Q - Q_0$. Logo:

$\Delta Q = Q - Q_0 = 0$ kg.m/s $- 1,1 \times 10^3$ kg.m/s

$\Delta Q = -1,1 \times 10^3$ kg.m/s

C) O módulo do impulso $\vec{I}$ exercido sobre o boneco é igual ao módulo da variação da quantidade de movimento deste, pois $\vec{I} = \Delta\vec{Q}$. Logo, o impulso exercido sobre o boneco é igual a $1,1 \times 10^3$ kg.m/s. É importante lembrar que o boneco é o nosso sistema e que esse impulso é exercido por um agente que não pertence ao sistema, o cinto de segurança. A força peso e a força normal também são forças externas, mas essas se cancelam. Já o efeito da força de atrito, outra força externa, é muito pequeno e pode ser desprezado.

D) O módulo da força que o cinto aplica sobre o boneco pode ser calculado pela relação $I = F\Delta t$.

$$F = \frac{1,1 \times 10^3 \text{ kg.m/s}}{0,15 \text{ s}} = 7,3 \times 10^3 \text{ kg.m/s}^2$$

$$\Rightarrow F = 7,3 \times 10^3 \text{ N} = 7,3 \times 10^2 \text{ kgf}$$

Como o cinto foi projetado para suportar 3 000 kgf, ele, sem dúvida, passou no teste.

04. (UNIFESP) Uma menina deixa cair uma bolinha de massa de modelar que se choca verticalmente com o chão e para. A bolinha tem massa 10 g e atinge o chão com velocidade de 3,0 m/s.

Pode-se afirmar que o impulso exercido pelo chão sobre essa bolinha é vertical, tem sentido para

A) cima e módulo $3,0 \times 10^{-2}$ N.s.

B) baixo e módulo $3,0 \times 10^{-2}$ N.s.

C) cima e módulo $6,0 \times 10^{-2}$ N.s.

D) baixo e módulo $6,0 \times 10^{-2}$ N.s.

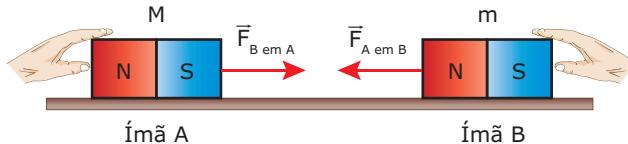
E) cima e módulo igual a zero.

Resolução:

A força exercida pelo chão sobre a bolinha possui direção vertical e sentido para cima. Logo, o impulso dessa força também será vertical para cima.

Para se calcular o módulo do impulso, basta utilizar o Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento. Considerando positivo o sentido vertical para cima, temos:

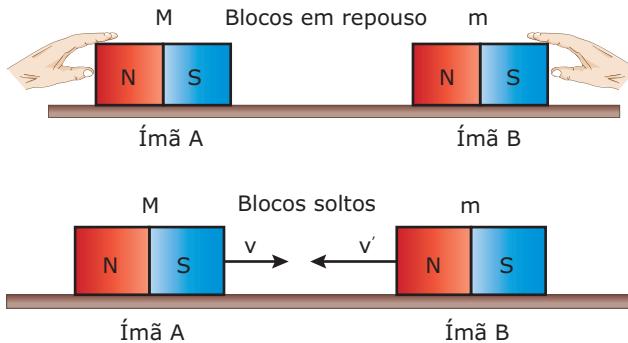
$I = \Delta Q \Rightarrow I = mv - mv_0 \Rightarrow I = m(v - v_0)$

$\Rightarrow I = 1,0 \times 10^{-2}\,[0 - (-3,0)]$

$\Rightarrow I = 3,0 \times 10^{-2}$ N.s

Assim, a alternativa correta é a A.

Conservação da Quantidade de Movimento

Sistema, forças internas e forças externas

Consideremos um sistema constituído por dois ímãs. Esses ímãs são colocados sobre uma superfície horizontal sem atrito e atraem-se mutuamente, como mostra a figura a seguir. Uma pessoa, externa ao sistema, segura os ímãs para que eles não entrem em movimento.

Os ímãs A e B constituem um sistema de corpos. As forças de interação entre os ímãs são forças internas ao sistema e não alteram a quantidade de movimento desse sistema.

Denominamos forças internas as forças de interação entre os corpos do sistema. No caso apresentado, as forças magnéticas de atração entre os ímãs são as forças internas, uma vez que os ímãs A e B constituem o sistema em estudo.

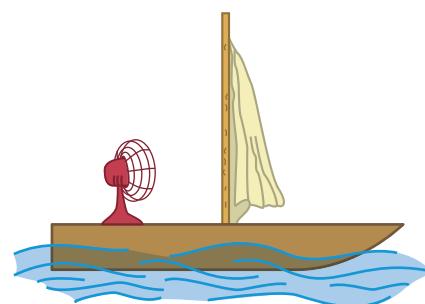
Já a força peso e a força de reação normal, tanto em A quanto em B, são forças externas. Essas forças são resultado da interação entre os ímãs e a Terra (no caso da força peso) e da interação entre os ímãs e a superfície da mesa (no caso da força normal). Como a Terra e a superfície da mesa não fazem parte do sistema, as forças peso e normal são forças externas.

Observa-se que, ao liberar os ímãs, eles se atraem e adquirem uma velocidade inversamente proporcional à sua massa, isto é, o de maior massa adquire, proporcionalmente, a menor velocidade, já que a força resultante sobre ambos tem o mesmo módulo. Isso tem uma importante consequência: a quantidade de movimento de cada ímã se altera devido à ação da força magnética, porém a quantidade de movimento total do sistema não varia.

Forças internas podem alterar a quantidade de movimento individual de cada partícula, porém a quantidade de movimento total do sistema permanece constante.

	Blocos em repouso	Blocos soltos
Força	$\|\vec{F}_{AB}\| = \|\vec{F}_{BA}\|$	$\|\vec{F}_{AB}\| = \|\vec{F}_{BA}\|$
Massa	$m_A > m_B$	$m_A > m_B$
Aceleração	$\|\vec{a}_A\| = \|\vec{a}_B\| = 0$	$\|\vec{a}_A\| < \|\vec{a}_B\|$
Velocidade	$\|\vec{v}_A\| = \|\vec{v}_B\| = 0$	$\|\vec{v}_A\| < \|\vec{v}_B\|$
Quantidade de movimento	$\|\vec{Q}_A\| = \|\vec{Q}_B\| = 0$	$\|\vec{Q}_A\| = -\|\vec{Q}_B\|$ $\Rightarrow \|\vec{Q}_{total}\| = 0$

Apesar de termos exemplificado um caso simples, o resultado anterior é válido para todas as situações em que o sistema está isolado, isto é, quando o sistema não está sujeito a forças externas.

$$\Sigma \vec{F}_{externas} = 0 \Rightarrow |\vec{I}_{externo}| \Rightarrow |\Delta\vec{Q}| = 0 \Rightarrow \vec{Q}_{antes} = \vec{Q}_{depois}$$

O resultado anterior é conhecido como Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento. Esse princípio nos mostra que, para que a quantidade de movimento do sistema se conserve, é necessário que este esteja isolado. Dizemos que um sistema está isolado de forças externas nos seguintes casos:

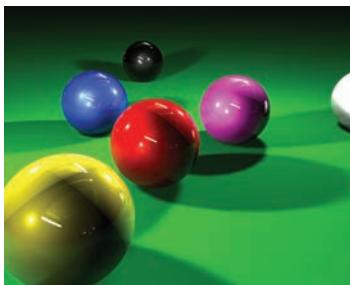
- não atuam forças externas sobre esse sistema;
- a resultante das forças externas que atuam sobre o sistema é nula;
- a resultante das forças externas atuantes sobre o sistema, apesar de não nula, possui módulo desprezível, se comparado aos módulos das forças internas que atuam no sistema.

O Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento de um sistema é um dos princípios fundamentais da Física, conjuntamente com outros princípios de conservação, como o Princípio da Conservação da Energia e o Princípio da Conservação da Carga Elétrica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

05. (UFMG) A figura mostra um ventilador que está dentro de um barco a vela.

Suponha que o ventilador é ligado e que o vento provocado por ele atinge apenas a área da vela.

Responder se, dessa forma, é possível o barco movimentar-se. Justificar sua resposta.

Resolução:

Somente as forças externas a um sistema podem provocar variação na sua quantidade de movimento. Na situação deste exercício, o sistema de estudo é constituído pelo barco e pelo ventilador. A ação do ventilador sobre a vela do barco é feita através do ar (sem o qual o ventilador nada faria); porém, o ar não faz parte do sistema. O ventilador exerce força sobre o ar e este exerce força sobre a vela. Surgem, então, as forças de reação da vela sobre o ar e do ar sobre o ventilador. A força exercida sobre a vela e a força exercida sobre o ventilador, ambas forças externas exercidas pelo ar, possuem módulos iguais e de sentidos opostos. Logo, a resultante dessas forças é nula, e não há aceleração atuando sobre o conjunto ventilador-barco. O sistema, portanto, se mantém em repouso.

Colisões, choques e explosões

Colisões, choques e explosões são situações nas quais as forças internas são muito grandes e atuam em curtos intervalos de tempo, ou seja, são situações em que a aplicação do Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento de um sistema mostra-se muito útil.

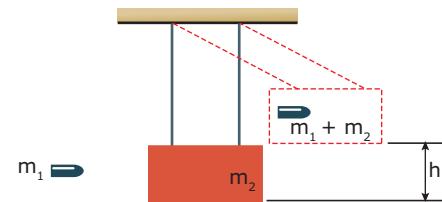
Nas colisões ideais, não há dissipação de energia mecânica e, nesse caso, temos uma colisão perfeitamente elástica, na qual a energia cinética total do sistema se conserva. Nas situações reais, parte da energia mecânica é convertida em outras formas de energia, como som, calor e trabalho, este realizado pelas forças de deformação. Denominamos colisão inelástica ou parcialmente elástica aquela em que a energia mecânica dos corpos que se chocam não se conserva. Existem colisões em que os corpos movem-se juntos após o choque e, nesse caso, a dissipação de energia mecânica é a maior possível. Chamamos esse tipo de colisão de colisão completamente inelástica.

Colisões como as que ocorrem em mesas de sinuca se aproximam muito de uma colisão perfeitamente elástica.

Apesar de o valor da energia mecânica sofrer uma redução na maior parte das colisões observadas, o módulo da quantidade de movimento dos sistemas isolados sempre permanece constante. As forças internas ao sistema possuem módulo muitas vezes superior ao das outras forças atuantes e, por isso, podemos afirmar que, imediatamente antes e imediatamente depois da colisão, o módulo da quantidade de movimento total do sistema é o mesmo. Entretanto, após a colisão, os efeitos das forças externas podem passar a ser significativos, o que provocará uma variação na quantidade de movimento do sistema.

Coeficiente de restituição

A perda de energia cinética em uma colisão entre dois corpos está associada à diminuição da velocidade relativa entre os mesmos. Assim, podemos usar a razão entre os módulos da velocidade relativa de afastamento após o choque ($v_{relat.afast.}$) e da velocidade relativa de aproximação antes do choque ($v_{relat.\ aprox}$) como uma medida da perda de energia cinética do sistema. Essa razão é conhecida como coeficiente de restituição (e).

$$e = \frac{v_{relat.afast.}}{v_{relat.aprox.}}$$

Nas colisões elásticas, o módulo da velocidade relativa de afastamento após o choque é igual ao módulo da velocidade relativa de aproximação antes do choque. Portanto, o coeficiente de restituição é igual a um (e = 1).

Nas colisões inelásticas, o módulo da velocidade relativa de afastamento após o choque é menor que o módulo da velocidade relativa de aproximação antes do choque. Portanto, o coeficiente de restituição é menor que um ($e < 1$).

O menor valor do coeficiente de restituição é zero (e = 0) e ocorre quando a velocidade relativa de afastamento após o choque é nula, ou seja, quando os corpos, após o choque, permanecem juntos (colisão completamente inelástica).

EXERCÍCIO RESOLVIDO

06. (UNESP) O pêndulo balístico é um sistema utilizado para medir a velocidade de um projétil que se move rapidamente. O projétil de massa m_1 é disparado em direção a um bloco de madeira de massa m_2, inicialmente em repouso, suspenso por dois fios, como ilustrado na figura. Após o impacto, o projétil se acopla ao bloco e ambos sobem a uma altura h.

A) Considerando que haja conservação da energia mecânica, determinar o módulo da velocidade do conjunto bloco-projétil após o impacto.

B) A partir do Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento, determinar a velocidade inicial do projétil.

Resolução:

A) Durante a subida, após o impacto, o valor da energia mecânica se conserva, ou seja, a energia cinética do sistema bloco-projétil se transforma integralmente em energia potencial gravitacional. Logo:

E_c (após a colisão) = E_p (ponto mais alto)

$$\Rightarrow \frac{(m_1 + m_2)v^2}{2} = (m_1 + m_2)gh$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

B) Imediatamente antes da colisão e imediatamente após a colisão, o módulo da quantidade de movimento do sistema bloco-projétil é o mesmo, uma vez que o sistema está isolado. Logo:

$$Q_{total\ antes} = Q_{total\ depois}$$

$$\Rightarrow m_1 v_{projétil} = (m_1 + m_2)v_{conjunto}$$

$$\Rightarrow v_{projétil} = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} v_{conjunto}$$

$$\Rightarrow v_{projétil} = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} \sqrt{2gh}$$

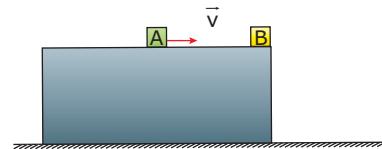
EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (Fatec-SP–2006) Uma esfera se move sobre uma superfície horizontal sem atrito. Num dado instante, sua energia cinética vale 20 J e sua quantidade de movimento tem módulo 20 N.s.

Nestas condições, é **CORRETO** afirmar que sua

A) velocidade vale 1,0 m/s.
B) velocidade vale 5,0 m/s.
C) velocidade vale 10 m/s.
D) massa é de 1,0 kg.
E) massa é de 10 kg.

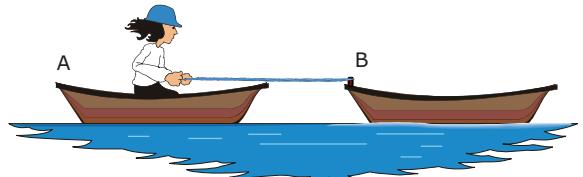
02. (UFJF-MG) A velocidade de uma bola de tênis, de massa 50 g, num saque muito rápido, pode chegar a 216 km/h, mantendo-se aproximadamente constante durante todo o tempo de voo da bola. Supondo que a bola esteja inicialmente em repouso, e que o tempo de contato entre a raquete e a bola seja de 0,001 s e sendo g = 10 m/s², pode-se afirmar que a força média aplicada à bola no saque é equivalente ao peso de uma massa de

A) 150 kg. B) 300 kg. C) 50 kg. D) 10 kg.

03. (Mackenzie-SP) Um caminhão a 90 km/h colide com a traseira de um automóvel que viaja com movimento de mesmo sentido e velocidade de 54 km/h. A massa do caminhão é o triplo da massa do automóvel. Imediatamente após a colisão, os dois veículos caminham juntos, com velocidade de

A) 66 km/h.
B) 68 km/h.
C) 72 km/h.
D) 78 km/h.
E) 81 km/h.

04. (UNIFESP) Uma esfera de massa 20 g atinge uma parede rígida com velocidade de 4,0 m/s e volta na mesma direção com velocidade de 3,0 m/s. O impulso da força exercida pela parede sobre a esfera, em N.s, é, em módulo, de

A) 0,020.
B) 0,040.
C) 0,10.
D) 0,14.
E) 0,70.

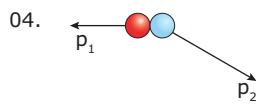
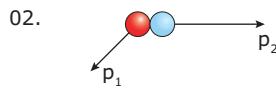
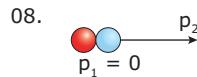
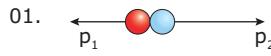
05. (UFG) A figura a seguir ilustra uma situação de colisão em que as forças dissipativas podem ser desprezadas.

O bloco A, de massa M_A, desliza sobre a plataforma horizontal com velocidade $\vec{v}$ e realiza uma colisão frontal, perfeitamente elástica, com o bloco B, de massa M_B, inicialmente em repouso. Pode-se afirmar que, após a colisão,

A) se $M_A > M_B$, somente o bloco B cairá.
B) se $M_A = M_B$, os dois blocos cairão.
C) se $M_A = M_B$, o bloco B cairá e o bloco A ficará parado.
D) os dois blocos cairão, independentemente dos valores de M_A e M_B.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFSC–2007) Na situação apresentada na figura a seguir, desconsidere o efeito do atrito.

Estando todas as partes em repouso no início, uma pessoa puxa com sua mão uma corda que está amarrada ao outro barco. Considere que o barco vazio (B) tenha a metade da massa do barco mais a pessoa que formam o conjunto (A).

Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

01. Após a pessoa puxar a corda, ambos os barcos se moverão com a mesma velocidade.
02. Após o puxar da corda, o módulo da velocidade de B será o dobro do módulo da velocidade de A.
04. É impossível fazer qualquer afirmação sobre as velocidades das partes do sistema ao se iniciar o movimento.
08. Após o puxar da corda, as quantidades de movimento dos barcos apresentarão dependência entre si.
16. Ao se iniciar o movimento, a energia cinética de A é sempre igual à energia cinética de B.

Soma ( )

02. (UFPR) Com base nos conceitos e nas leis da conservação da quantidade de movimento (momento linear) e da energia cinética, assinale **VERDADEIRO** ou **FALSO**.

( ) A quantidade de movimento (momento linear) de uma partícula depende do sistema de referência.

( ) A energia cinética de uma partícula pode assumir valores negativos.

( ) Em uma colisão perfeitamente elástica, a energia cinética é conservada.

( ) Em uma colisão inelástica, a quantidade de movimento (momento linear) não é conservada.

( ) Quando duas partículas colidem, a velocidade do centro de massa do sistema, na ausência de forças externas, permanece constante.

03. (UFSC–2006) Durante as festividades comemorativas da Queda da Bastilha, na França, realizadas em 14 de julho de 2005, foram lançados fogos de artifício em homenagem ao Brasil. Durante os fogos, suponha que um rojão com defeito, lançado obliquamente, tenha explodido no ponto mais alto de sua trajetória, partindo-se em apenas dois pedaços que, imediatamente após a explosão, possuíam quantidades de movimento p_1 e p_2.

Considerando-se que todos os movimentos ocorrem em um mesmo plano vertical, assinale a(s) proposição(ões) que apresenta(m) o(s) par(es) de vetores p_1 e p_2 fisicamente **POSSÍVEL(EIS)**.

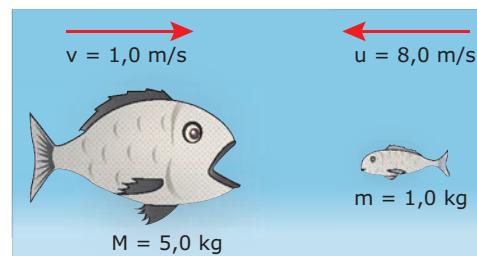
01.

02.

04.

p_1 p_2

08.

16.

Soma ( )

04. (ITA-SP–2005) Um automóvel para quase que instantaneamente ao bater frontalmente numa árvore. A proteção oferecida pelo *airbag*, comparativamente ao carro que dele não dispõe, advém do fato de que a transferência para o carro de parte do *momentum* do motorista se dá em condição de

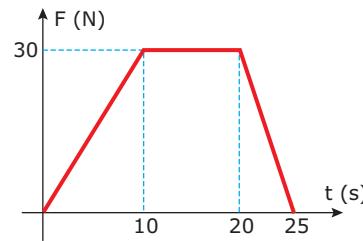
A) menor força, em maior período de tempo.

B) menor velocidade, com mesma aceleração.

C) menor energia, numa distância menor.

D) menor velocidade e maior desaceleração.

E) mesmo tempo, com força menor.

05. (UFPI) Na figura a seguir, o peixe maior, de massa M = 5,0 kg, nada para a direita a uma velocidade v = 1 m/s, e o peixe menor, de massa m = 1,0 kg, se aproxima dele a uma velocidade u = 8,0 m/s, para a esquerda.

Despreze qualquer efeito de resistência da água.

Após engolir o peixe menor, o peixe maior terá uma velocidade de

A) 0,50 m/s, para a esquerda.

B) 1,0 m/s, para a esquerda.

C) nula.

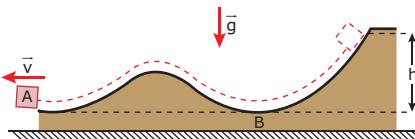
D) 0,50 m/s, para a direita.

E) 1,0 m/s, para a direita.

06. (PUC-SP) O gráfico representa a força resultante sobre um carrinho de supermercado de massa total 40 kg, inicialmente em repouso.

A intensidade da força constante que produz o mesmo impulso que a força representada no gráfico durante o intervalo de tempo de 0 a 25 s é, em newtons, igual a

A) 1,2. C) 15. E) 21.

B) 12. D) 20.

07. (UFRGS) Um par de carrinhos idênticos, cada um com massa igual a 0,2 kg, move-se sem atrito, da esquerda para a direita, sobre um trilho de ar reto, longo e horizontal. Os carrinhos, que estão desacoplados um do outro, têm a mesma velocidade de 0,8 m/s em relação ao trilho. Em dado instante, o carrinho traseiro colide com um obstáculo que foi interposto entre os dois. Em consequência dessa colisão, o carrinho traseiro passa a se mover da direita para a esquerda, mas ainda com velocidade de módulo igual a 0,8 m/s, enquanto o movimento do carrinho dianteiro prossegue inalterado. Em relação ao trilho, os valores, em kg.m/s, da quantidade de movimento linear do par de carrinhos antes e depois da colisão são, respectivamente,

A) 0,16 e zero. D) 0,32 e zero.

B) 0,16 e 0,16. E) 0,32 e 0,48.

C) 0,16 e 0,32.

08. (UNESP) Em um teste de colisão, um automóvel de 1 500 kg colide frontalmente com uma parede de tijolos. A velocidade do automóvel anterior ao impacto era de 15 m/s. Imediatamente após o impacto, o veículo é jogado no sentido contrário ao do movimento inicial com velocidade de 3 m/s. Se a colisão teve duração de 0,15 s, a força média exercida sobre o automóvel durante a colisão foi de

A) $0,5 \times 10^4$ N.

B) 1×10^4 N.

C) 3×10^4 N.

D) 15×10^4 N.

E) 18×10^4 N.

09. (UFG–2007) Um corpo é lançado do chão com velocidade v e ângulo de inclinação de 60° com a horizontal. Quando atinge a altura máxima, colide inelasticamente com outro corpo de mesma massa e velocidade v, que estava em queda livre. Considerando desprezíveis as forças externas durante a colisão, o módulo da velocidade imediatamente após o choque é

A) $\left(\frac{\sqrt{5}}{4}\right)v.$

B) $\left(\frac{\sqrt{3}}{8}\right)v.$

C) (3/4)v.

D) $\left(\sqrt{\frac{3}{4}}\right)v.$

E) (3/8)v.

10. (UFAM) O corpo B da figura tem massa m_B = 20 kg e pode mover-se sem atrito sobre uma superfície horizontal. Do topo deste, como ilustra a figura, abandona-se um corpo A de massa m_A = 10 kg que, após deslizar sem atrito sobre a superfície ondulada do corpo B, dela se separa, com uma velocidade horizontal v = 4,0 m/s, a uma altura h abaixo da posição inicial.

Com base nas leis da Conservação da Energia Mecânica e da Quantidade de Movimento, podemos afirmar que o valor da velocidade final do corpo B e a altura h valem, respectivamente,

A) 2,0 m/s e 1,0 m.

B) 2,0 m/s e 0,8 m.

C) 4,0 m/s e 1,2 m.

D) 2,0 m/s e 1,2 m.

E) 4,0 m/s e 0,8 m.

11. (UERJ–2007) Um estudante, ao observar o movimento de uma partícula, inicialmente em repouso, constatou que a força resultante que atuou sobre a partícula era não nula e manteve módulo, direção e sentido inalterados durante todo o intervalo de tempo da observação. Desse modo, ele pôde classificar as variações temporais da quantidade de movimento e da energia cinética dessa partícula, ao longo do tempo de observação, respectivamente, como

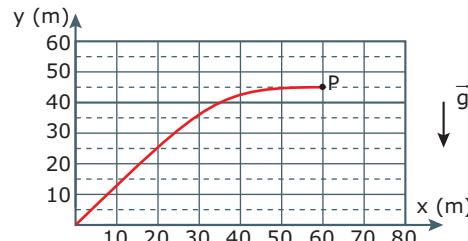
A) linear; linear.

B) constante; linear.

C) linear; quadrática.

D) constante; quadrática.

12. (EFOA-MG) Dois blocos de massas iguais e encostados um no outro se deslocam sobre uma superfície horizontal sem atrito, com velocidade constante, conforme figura a seguir:

Bloco 1 Bloco 2

Entre os dois blocos, existe um explosivo de massa desprezível que é detonado, fazendo com que os blocos passem a se distanciar um em relação ao outro. Em relação a esse fato, é **CORRETO** afirmar que

A) como um bloco está se afastando em relação ao outro, então a energia cinética total dos dois blocos é nula.

B) a enegia cinética dos dois blocos, antes e depois da explosão, é a mesma.

C) a quantidade de movimento total dos dois blocos, antes e depois da explosão, é a mesma.

D) como um bloco está se afastando em relação ao outro, então a quantidade de movimento total dos dois blocos é nula.

E) tanto a energia cinética total como a quantidade de movimento total dos dois blocos diminuem após a explosão.

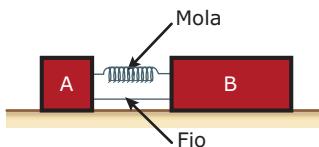
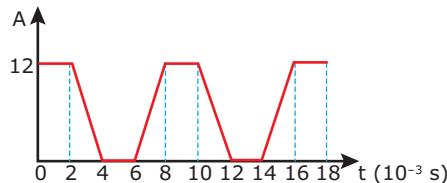
13. (UEFS-BA) Deixa-se cair, de uma altura de 8 m, sobre uma superfície plana horizontal, uma bola que rebate e atinge uma altura de 2 m. Com base nessa informação, pode-se afirmar que o coeficiente de restituição entre a bola e a superfície é igual a

A) 0,1.

B) 0,2.

C) 0,3.

D) 0,4.

E) 0,5.

14. (FUVEST-SP) Num espetáculo de fogos de artifício, um rojão, de massa M_0 = 0,5 kg, após seu lançamento, descreve no céu a trajetória indicada na figura. No ponto mais alto de sua trajetória (ponto P), o rojão explode, dividindo-se em dois fragmentos, A e B, de massas iguais a $M_0/2$. Logo após a explosão, a velocidade horizontal de A, v_A, é nula, bem como sua velocidade vertical.

Note e adote: A massa do explosivo pode ser considerada desprezível.

A) **DETERMINE** o intervalo de tempo T_0, em segundos, transcorrido entre o lançamento do rojão e a explosão no ponto P.

B) **DETERMINE** a velocidade horizontal v_0, do fragmento B, logo após a explosão, em m/s.

C) Considerando apenas o que ocorre no momento da explosão, **DETERMINE** a energia E_0 fornecida pelo explosivo aos dois fragmentos A e B, em joules.

15. (UFPE–2006) Dois blocos A e B, de massas m_A = 0,2 kg e m_B = 0,8 kg, respectivamente, estão presos por um fio, com uma mola ideal comprimida entre eles. Os blocos estão inicialmente em repouso, sobre uma superfície horizontal e lisa. Em um dado instante, o fio se rompe liberando os blocos com velocidades v_A e v_B, respectivamente. **CALCULE** a razão v_A/v_B entre os módulos das velocidades.

16. (UFU-MG–2006) Considere o gráfico adiante, que representa a grandeza A em função do tempo t (em unidades de 10^{-3} s).

A) Se a grandeza A representar a amplitude de uma onda sonora, **DETERMINE** sua frequência.

B) Se a grandeza A representar o módulo da quantidade de movimento (em kg.m/s) de um corpo de massa m = 3 kg, **DETERMINE** a variação da energia cinética desse corpo entre os instantes t = 0 s e t = 6 x 10^{-3} s.

SEÇÃO ENEM

01. Suponha que existam três astronautas do lado de fora de uma nave espacial e que eles decidam brincar de se arremessarem. Todos eles possuem o mesmo peso na Terra e todos são igualmente fortes. O primeiro astronauta arremessa o segundo para o terceiro e a brincadeira tem início. Quantas arremessadas a mais ainda será possível realizar?

A) 1 B) 2 C) 3 D) 4 E) 5

02. Quando uma arma de fogo é disparada, ao contrário do que se deve esperar, o valor do momento da bala é menor que o valor do momento da arma que recua.

Essa aparente violação do Princípio da Conservação da Quantidade de Momento Linear de um sistema pode ser explicada

A) pela expansão dos gases que também entram em movimento para frente junto com a bala.

B) pela força da gravidade que atua na bala, na direção perpendicular ao movimento desta.

C) pela maior massa do revólver que reduz a velocidade da bala e, consequentemente, seu momento linear.

D) pelo efeito da força de resistência do ar sobre a bala quando esta entra em movimento.

E) pelas forças externas que atuam na bala e que alteram, com o passar do tempo, seu momento linear.

03. Em 13 de janeiro de 1920, o jornal *The New York Times* publicou um editorial atacando Robert Goddard – um físico que propunha utilizar foguetes para viagens espaciais. Dizia o editorial:

O que o Prof. Goddard, com sua "cadeira" no Clark College, e seus colaboradores do Instituto Smithsoniano não conhecem é a relação entre ação e reação e a necessidade de ter algo melhor que o vácuo contra o qual reagir – o que dizem é um absurdo. Naturalmente, ele só parece não ter o conhecimento diariamente ensinado nas escolas de Ensino Médio.

O erro científico do editorial foi

A) definir de forma equivocada o vácuo que, na Física Moderna, não significa ausência de matéria.

B) desconsiderar que componentes do foguete são empurradas para trás durante o lançamento.

C) esquecer que um foguete tem que empurrar algo material para que consiga se mover.

D) impedir que ideias não testadas pudessem ser colocadas à prova experimental para então serem debatidas.

E) não conhecer as exceções de aplicação das Leis de Newton para os movimentos, em particular a 3ª Lei.

GABARITO

Fixação

01. E 02. B 03. E 04. D 05. C

Propostos

01. Soma = 10
02. V F V F V
03. Soma = 09
04. A 05. A 06. E 07. D 08. E 09. A 10. D 11. C 12. C 13. E
14. A) 3,0 s
B) 40 m/s
C) 100 J
15. $v_A/v_B = 4$
16. A) f = 125 Hz
B) $\Delta E_c = -24$ J

Seção Enem

01. A 02. A 03. B

FÍSICA

MÓDULO 11 FRENTE B

Teoremas de Torricelli e Stevin

Finalizada a Mecânica dos Sólidos, vamos, neste e no próximo módulo, abordar a Hidrostática, área da Física reservada ao estudo do equilíbrio nos líquidos. Diversos aparelhos e situações do nosso dia a dia são explicados com base nos princípios da Hidrostática, como o sistema de distribuição de água em uma cidade, o freio hidráulico de um carro, a flutuação de uma embarcação no mar, etc.

Iniciaremos o módulo apresentando dois conceitos importantes para o estudo da Hidrostática: densidade e pressão. Em seguida, vamos explicar o que é pressão atmosférica e como Torricelli mediu, originalmente, o seu valor. Por último, vamos estudar a equação fundamental da Hidrostática.

DENSIDADE

Você já deve ter notado que as pessoas se referem ao chumbo como exemplo de algo pesado. Entretanto, tratando a situação com rigor físico, é impreciso dizer que o chumbo é mais pesado do que, por exemplo, a madeira. Pense em um pequeno pedaço de chumbo que você sustenta na palma da mão. Certamente, ele é muito mais leve do que uma grande tora de madeira sobre o solo, a qual você mal consegue mover. O chumbo, na verdade, é mais denso do que a madeira. Isso significa que a quantidade de massa presente em certo volume de chumbo é maior do que a quantidade de massa presente em um mesmo volume de madeira.

A densidade, também denominada massa específica, é uma propriedade física intensiva da matéria que indica o quanto a massa de uma substância se acha compactada em dado volume. Por exemplo, à temperatura ambiente, a densidade do chumbo é 11,3 g/cm³, e a do carvalho (um tipo de madeira) é cerca de 0,70 g/cm³. Esses valores indicam que um volume de 1 cm³ de chumbo tem massa de 11,3 g, enquanto 1 cm³ da madeira tem massa de apenas 0,70 g.

A densidade dos materiais depende da temperatura, pois o volume de certa quantidade de matéria varia com a temperatura. Com raras exceções (a água, entre 0 ºC e 4 ºC, é uma delas), a matéria se dilata quando a temperatura aumenta. Por isso, para a maioria dos corpos, quando a temperatura aumenta, a massa, que é constante, fica distribuída em um volume maior, de forma que a matéria torna-se menos compactada, isto é, menos densa.

A tabela a seguir apresenta o valor da densidade de algumas substâncias. Para os gases, que são substâncias compressíveis, a densidade depende, além da temperatura, também da pressão. Os sólidos e os líquidos são praticamente incompressíveis, e, por isso, suas densidades dependem essencialmente da temperatura. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de densidade é o kg/m³. Para converter os valores de densidade dessa tabela para o SI, basta multiplicar os valores por 10^3. Assim, por exemplo, a densidade da água, no SI, é $1{,}0 \times 10^3$ kg/m³.

Estado	Substância	Densidade (g/cm³)
Sólidos à temperatura ambiente	Chumbo	11,3
	Alumínio	2,7
	Osso	1,7 a 2,0
	Carvalho	0,60 a 0,90
Líquidos à temperatura ambiente	Gasolina	0,70
	Etanol	0,80
	Água	1,0
	Mercúrio	13,6
Gases a 1 atm e 25 ºC	Ar	0,0012
	Hélio	0,00016

Podemos calcular a densidade de um corpo por meio da razão mostrada a seguir, em que m e V são a massa e o volume do corpo, respectivamente. A massa pode ser medida facilmente em uma balança. O volume pode ser calculado utilizando uma expressão específica quando o corpo possuir uma geometria padrão, como a de um cubo ou a de uma esfera. Para geometrias não convencionais, como a de uma pedra, o volume pode ser determinado mergulhando o corpo em um recipiente com água e coletando / medindo o volume de água deslocado, que será numericamente igual ao volume do corpo. Na figura 1, que ilustra essa técnica, você saberia calcular a densidade da pedra, sabendo que a sua massa vale 800 g?

$$\rho = \frac{m}{V}$$

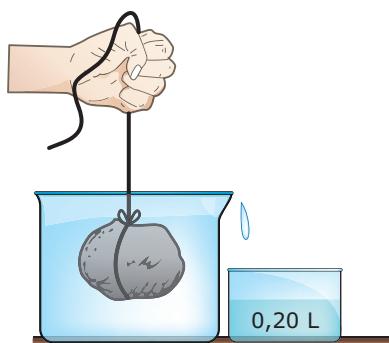



Figura 1: Técnica experimental para se medir o volume de um corpo.

PRESSÃO

Algumas pessoas confundem força com pressão. Para entender a diferença que há entre essas grandezas, considere a figura 2. Nela, há dois tijolos iguais, um em pé, apoiado sobre a face menor, e o outro deitado sobre a face maior. É claro que as forças de compressão que os dois tijolos exercem sobre a mesa são iguais, pois eles apresentam o mesmo peso. Porém, o tijolo que está de pé exerce maior pressão sobre a mesa, pois a força de compressão exercida por esse tijolo está distribuída sobre uma área menor. Cada cm^2 de área debaixo desse tijolo sofre ação de uma força de maior intensidade do que a força que age sobre cada cm^2 de área que está sob o outro tijolo. Quanto menor a área de apoio, maior é a pressão que certa força exerce sobre essa área. Se um dos tijolos for inclinado, de forma a ficar apoiado sobre uma das arestas, a área de apoio será muito pequena, a pressão será muito grande e talvez a quina do tijolo se quebre em algum ponto, caso o material do tijolo não seja de boa qualidade. Isso revela que, da mesma forma que o tijolo exerce uma pressão sobre a mesa, esta também exerce uma pressão sobre o tijolo. Isso nada mais é do que uma decorrência da lei de ação e reação.

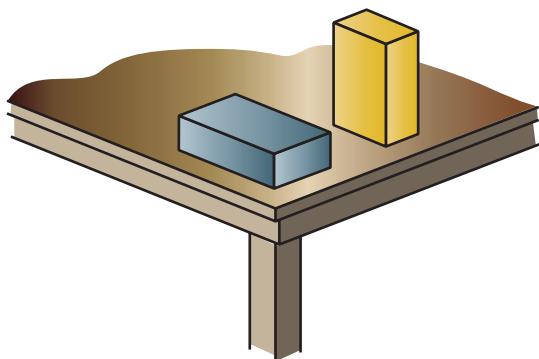



Figura 2: Tijolos iguais exercem pressões diferentes sobre uma superfície, dependendo da base de apoio sobre a qual estão apoiados.

Para calcular a pressão que uma força exerce sobre uma superfície, usamos o quociente a seguir, em que F é a intensidade da força e A é a área sobre a qual a força está atuando. De acordo com essa equação, a unidade de pressão, no SI, é N/m^2, também denominada Pascal (Pa), em homenagem ao francês Blaise Pascal, por suas contribuições em Mecânica dos Fluidos. Neste módulo, além do Pascal, usaremos duas outras unidades de pressão: a atmosfera (atm) e o milímetro de coluna de mercúrio (mmHg).

$$\rho = \frac{F}{A}$$

A discussão anterior de que uma mesma força, dependendo da área sobre a qual atua, pode exercer diferentes pressões está de acordo com essa equação, a qual mostra que, para uma mesma força, quanto maior a área, menor a pressão, e vice-versa. Uma experiência simples para confirmar esse fato está representada na figura 3, que mostra as pontas e as cabeças de dois pregos pressionando dois cadernos (de grande espessura para evitar acidentes). Usando a condição de equilíbrio translacional e a lei de ação e reação, podemos mostrar que as intensidades das forças que os pregos exercem sobre os cadernos são iguais nos quatro pontos de contato. Contudo, tendo áreas muito pequenas, as pontas exercem pressões sobre os cadernos muito maiores do que as pressões exercidas pelas cabeças dos pregos. Isso pode ser constatado observando que as pontas dos pregos perfuram os cadernos, mas que as cabeças não perfuram.

Figura 3: Experiência para mostrar que forças iguais podem exercer pressões diferentes.

A dependência entre a pressão e a área é verificada em várias situações do nosso dia a dia. Às vezes, desejamos exercer uma pressão pequena e, para conseguir isso, usamos uma área grande. Um exemplo desse caso ocorre quando nos sentamos em uma cadeira anatômica. O grande conforto que sentimos decorre do fato de exercermos uma pequena pressão sobre o assento, uma vez que a força de compressão do nosso corpo sobre a cadeira é distribuída sobre uma área muito maior do que a área do assento das cadeiras comuns. Outras vezes, queremos exercer uma pressão grande e, para isso, usamos uma área pequena. Esse é o caso, por exemplo, de um bisturi cirúrgico. A área de apoio do instrumento é tão pequena que uma mínima força exercida sobre o bisturi produz uma pressão grande o suficiente para cortar a pele do paciente. Preste atenção em outros objetos e fatos do seu dia a dia. Certamente você perceberá muitas situações em que a pressão desejada (grande ou pequena) é obtida por meio da utilização de uma área adequada para a superfície de apoio da força.

PARA REFLETIR

Para um carro atravessar um terreno arenoso e fofo, por que é conveniente esvaziar um pouco os pneus?

PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Como você sabe, o ar atmosférico é constituído por partículas que se movem caoticamente em todas as direções. Por isso, as paredes, o solo, as pessoas e todos os outros corpos imersos na atmosfera terrestre ficam sujeitos às forças de impacto dessas partículas. A pressão atmosférica é, portanto, a soma das pressões que as partículas constituintes do ar exercem sobre um objeto que se acha imerso na atmosfera.

O ar atmosférico está mais comprimido ao nível do mar do que em altitudes mais elevadas. Esse fato pode ser visualizado por meio de uma analogia com um catálogo telefônico, deitado sobre uma mesa, que apresenta as folhas de baixo mais compactadas do que as folhas de cima. Ao nível do mar, a pressão atmosférica vale:

$$P_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

Com boa aproximação, para cada aumento de 5,5 km na altitude, a pressão atmosférica é reduzida à metade. Esse tipo de comportamento caracteriza uma redução exponencial de uma grandeza. A figura 4 mostra a variação da pressão atmosférica com a altitude. Observe que, para altitudes de 10 km, típica de aviões de grande porte, a pressão atmosférica é, aproximadamente, 0,4 atm, e por isso o interior desses aviões deve ser pressurizado.

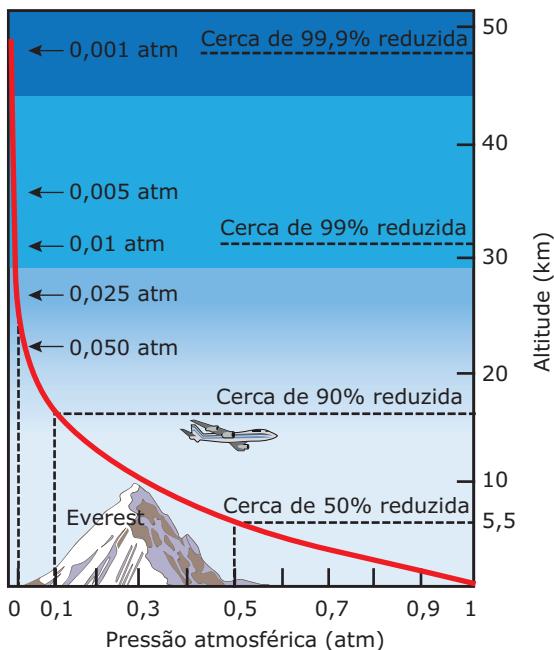



Figura 4: Variação da pressão atmosférica com a altitude.

Em 1664, o italiano Evangelista Torricelli mediu a pressão atmosférica ao nível do mar por meio de uma experiência extraordinariamente simples. Torricelli encheu um longo tubo de ensaio com mercúrio. Em seguida, com o dedo, ele fechou a boca do tubo, colocou-o de cabeça para baixo e mergulhou-o em uma bacia também com mercúrio. Retirando o dedo, ele observou que a coluna de mercúrio desceu um pouco, estabilizando-se a uma altura de 760 mm, conforme mostra a figura 5. Como no espaço vazio criado pela descida do mercúrio no tubo havia vácuo, Torricelli concluiu que a pressão exercida pela coluna de 760 mm de mercúrio foi equilibrada pela pressão atmosférica exercida pelo ar sobre a superfície livre do mercúrio na bacia. Repetindo a experiência acima do nível do mar, Torricelli verificou que a coluna equilibrada era menor do que 760 mm, revelando que a pressão atmosférica é máxima ao nível do mar, e que ela diminui com a altitude. O mais simples dos barômetros, aparelho usado para medir a pressão atmosférica, é baseado na montagem da figura 5.

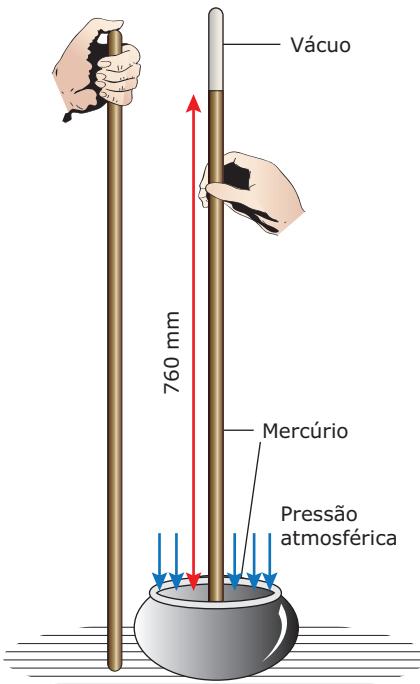



Figura 5: Experimento de Torricelli para medir a pressão atmosférica.

PARA REFLETIR

Para medir a pressão atmosférica, por que Torricelli optou por usar o mercúrio, e não a água, que é um líquido muito mais acessível?

PRESSÃO DE UM LÍQUIDO

Os líquidos diferem dos sólidos por não serem resistentes aos esforços de cisalhamento, isto é, aos esforços cortantes. Por isso, ao ser derramado em um vaso, um líquido se deforma e se adapta à forma do recipiente, qualquer que ela seja. Mais do que isso, um líquido exerce pressão não apenas sobre o fundo do recipiente, mas também sobre as suas paredes. As forças de compressão que geram tais pressões são sempre perpendiculares ao fundo e às paredes do recipiente, independentemente de as paredes serem verticais ou inclinadas. Isso pode ser facilmente verificado colocando-se água em uma lata amassada e com alguns furos, como mostra a figura 6. Observe que a água sai através de todos os furos, formando ângulos retos com as paredes.

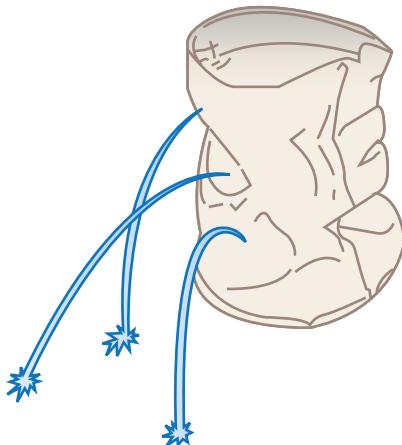



Figura 6: A pressão da água age perpendicularmente às paredes do recipiente.

Observe, na figura 6, que os dois jatos que partem dos dois furos superiores se encurvam prontamente para baixo, enquanto o jato que sai do furo inferior tem uma curvatura bem menos acentuada. Essas curvaturas diferenciadas sugerem que a velocidade de lançamento do jato aumente com a profundidade dentro da água, o que pode ser justificado pelo fato de que a pressão da água aumenta com a profundidade. Isso parece bastante lógico, uma vez que, quanto maior for a profundidade de certo ponto dentro da água, maior será a quantidade de água sobre esse ponto e, consequentemente, maior será a pressão exercida pela coluna de água acima dele.

Outra característica importante dos líquidos é que a pressão exercida por eles comprime todos os pontos de seu interior e age em todas as direções e sentidos. A figura 7 representa uma experiência simples para confirmar esse comportamento. Note nessa figura que todos os medidores de pressão encontram-se à mesma profundidade (ao mesmo nível) e registram o mesmo valor independentemente da orientação do funil. Para um mesmo nível, além de a pressão ser igual, ela atua em todas as direções e sentidos, seja de cima para baixo, de baixo para cima ou lateralmente.

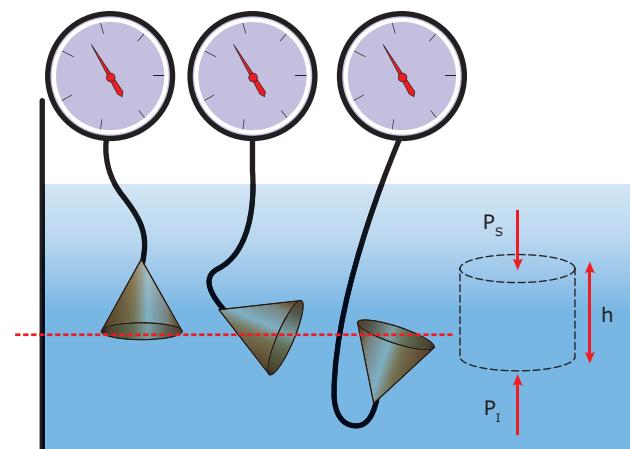



Figura 7: A pressão exercida por um líquido atua em todos os sentidos.

A expressão que fornece o valor da pressão P em um ponto no interior de um líquido de densidade ρ, a uma profundidade h, é:

$$P - P_0 = \rho gh \Rightarrow P = P_0 + \rho gh$$

Vamos deduzir essa equação. Na figura 7, observe o volume de líquido delimitado pelo cilindro de altura h, representado por um traço pontilhado. De acordo com a discussão apresentada, a pressão do líquido comprime esse cilindro em todas as direções. Lateralmente, as pressões no lado esquerdo e no lado direito se cancelam. Porém, o mesmo não ocorre com a pressão P_S na face superior e com a pressão P_I na face inferior. Como a profundidade é maior na face de baixo, temos $P_I > P_S$. Lembrando que a força exercida pela água sobre as faces do cilindro pode ser calculada por meio do produto entre cada uma das pressões P_I e P_S e a área A das faces, concluímos que a força exercida pela água sobre a face inferior é maior do que a força exercida pela água sobre a face superior. Como o cilindro está em equilíbrio, a diferença entre essas forças deve ser igual ao peso do líquido contido no cilindro. Logo:

$$P_I.A - P_S.A = m.g = \rho.V.g$$

O segundo lado dessa equação expressa o peso do líquido dentro do cilindro, dado pelo produto entre a massa do líquido e a aceleração da gravidade. Por sua vez, essa massa pode ser expressa como o produto entre a densidade do líquido, ρ, e o volume do cilindro, V. Já o volume, V, pode ser substituído por A.h. Finalmente, cancelando A, que aparece nos dois lados da equação, obtemos a expressão desejada, $P_I - P_S = \rho gh$, que também é conhecida como o Teorema de Stevin.

Segundo essa equação, a pressão no interior de um líquido é a soma de duas parcelas. Uma é a pressão atmosférica, P_0, que atua na superfície livre do líquido e se transmite para todas as partes internas dele. A outra parcela, ρgh, é a pressão exercida pela própria coluna de líquido acima do ponto considerado. A título de exemplo,

vamos usar a equação anterior para calcular a pressão em um ponto a uma profundidade h = 10 m abaixo da superfície do mar. Considerando $P_0 = 1,0 \times 10^5$ N/m² (1 atm), $\rho_{água} = 1,0 \times 10^3$ kg/m³ e g = 10 m/s² e substituindo esses valores na equação, obtemos:

$P = 1,0 \times 10^5 + 1,0 \times 10^3.10.10$
$\Rightarrow 1,0 \times 10^5 + 1,0 \times 10^5 = 2,0 \times 10^5$ N/m²

Ou ainda, P = 1 atm + 1 atm = 2,0 atm.

Veja que o valor da pressão exercida pela coluna de 10 m de água coincide com o valor da própria pressão atmosférica ao nível do mar, isto é, uma coluna de 10 m de água exerce uma pressão de 1 atm.

Memorize esse resultado, pois ele pode ser útil para você calcular rapidamente o valor da pressão em um ponto dentro da água. Por exemplo, em um lago com 30 m de profundidade, a pressão no fundo vale 4 atm, pois 1 atm é devido à pressão atmosférica (isso se o lago estiver ao nível do mar), e 3 atm são devidos aos 30 m de coluna de água.

Outra conclusão muito importante que podemos tirar da equação anterior é a seguinte:

> Todos os pontos situados em um mesmo nível, no interior de um mesmo líquido, em equilíbrio, estão sujeitos a pressões de mesmos valores.

Essa igualdade de pressões é válida mesmo para situações em que o líquido acha-se em recipientes curvos ou com geometrias especiais, como o recipiente mostrado na figura 8. Esse recipiente é conhecido pelo nome de vasos comunicantes. Quando colocamos um líquido em um recipiente desse tipo, e desde que todas as bocas estejam expostas à mesma pressão externa (por exemplo, a pressão atmosférica), observamos que o líquido atinge níveis iguais em todas as bocas dos vasos. Assim, na figura 8, as pressões nos pontos M, N, O e P são iguais à pressão atmosférica P_0. Os pontos R, S, T e U também estão sujeitos a pressões iguais, cujo valor é a soma da pressão atmosférica P_0 com a pressão exercida pela coluna de líquido, de altura h, indicada na figura. As pressões nos pontos X, Y e Z também são iguais, sendo iguais à soma de P_0 com a pressão exercida pela coluna de líquido de altura H.

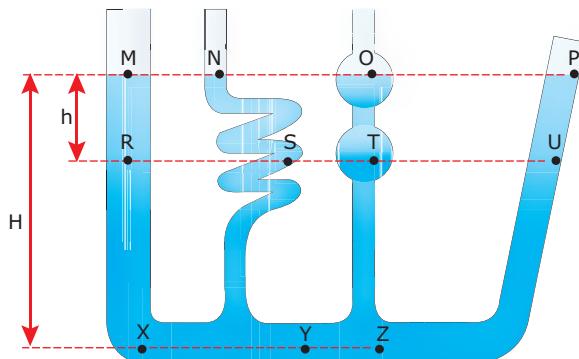



Figura 8: No interior de um líquido em repouso, as pressões em um mesmo nível são iguais.

Quando dois líquidos não miscíveis e de densidades diferentes são colocados em dois vasos comunicantes, cujas bocas estão expostas a um mesmo ambiente, observamos que os níveis atingidos nos dois ramos são diferentes. Esse é o caso ilustrado na figura 9, em que um pouco de água e um pouco de óleo foram colocados em um tubo, na forma de U, aberto para a atmosfera.

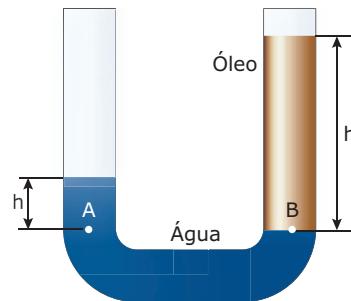



Figura 9: O óleo e a água não atingem o mesmo nível dentro do tubo em U.

De acordo com a teoria exposta anteriormente, as pressões P_A e P_B nos pontos A e B são iguais, pois esses pontos acham-se sobre uma mesma linha horizontal e ambos situam-se na água (o ponto B também está em contato com o óleo). De acordo com a figura, podemos concluir que a densidade (ρ') do óleo é menor do que a densidade (ρ) da água, pois, para haver a igualdade entre as pressões P_A e P_B, a coluna de maior altura (h') sobre o ponto B deve ser compensada pela maior densidade da água, cuja coluna (h) sobre o ponto A é menor. Para obter a relação matemática entre h e h', devemos igualar as pressões P_A e P_B e utilizar a Equação de Stevin.

$$P_A = P_B \Rightarrow P_0 + \rho g h = P_0 + \rho' g h' \Rightarrow \rho h = \rho' h'$$

Podemos usar essa relação para determinar a densidade do óleo a partir da densidade da água (ρ = 1,0 g/cm³) e das alturas h e h'. Por exemplo, para h = 15 cm e h' = 18 cm, temos:

$$1,0.15 = \rho'.18 \Rightarrow \rho' = 0,83 \text{ g/cm}^3$$

Vamos finalizar esta seção analisando a figura 10, que mostra um manômetro de tubo em U, usado para medir a pressão de um gás encerrado em um recipiente. Dentro do tubo em U, existe mercúrio. No lado esquerdo do tubo, o mercúrio sofre a ação da pressão P_G, exercida pelo gás. No lado direito do tubo, o mercúrio sofre a ação da pressão atmosférica P_0. Observe que o gás empurra o mercúrio para baixo, forçando a elevação da coluna de mercúrio no lado oposto. Os valores de pressão em pontos situados em um mesmo nível do mercúrio são iguais. Então, a pressão no ponto 1 (P_G) é igual à pressão no ponto 2, imposta pelos efeitos do peso da coluna de mercúrio sobre o ponto 2 e da pressão atmosférica sobre a superfície livre do líquido. Assim, concluímos que $P_G > P_0$.

Para calcular esses efeitos, é conveniente usar, como unidade de pressão, o mmHg (milímetros de mercúrio). Digamos que a coluna h seja igual a 400 mm e que a pressão atmosférica seja igual a 680 mmHg (como P_0 é menor do que 760 mmHg, o ambiente deve estar acima do nível do mar). Então, a pressão do gás é:

P_G = (400 + 680) mmHg

$\Rightarrow P_G$ = 1 080 mmHg = 1,42 atm

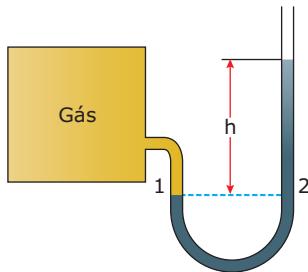
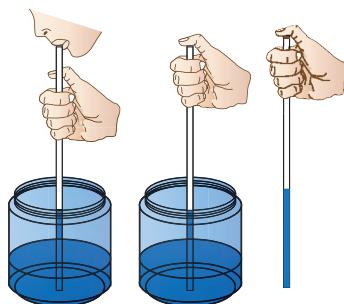
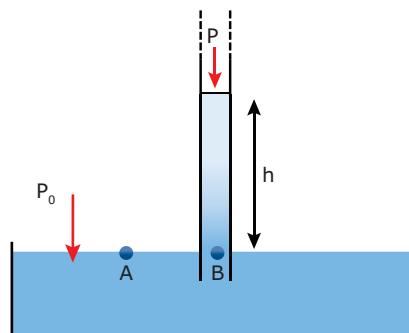



Figura 10: Manômetro de tubo em U.

PARA REFLETIR

Considere uma garrafa PET com água, aberta na boca e com um furo na parede. Por que você interrompe o jato de água que sai pelo furo quando você tampa a boca da garrafa? Por que o jato também é interrompido caso você deixe a garrafa cair em queda livre?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Durante uma aula de laboratório, um professor realizou a experiência ilustrada na figura a seguir. Primeiro, ele sugou a água de um recipiente utilizando um tubo transparente, aberto nas extremidades, e com cerca de 1 m de comprimento. Em seguida, ele tampou rapidamente a extremidade superior do tubo com a mão. Por último, o professor retirou o tubo do recipiente e mostrou aos alunos que a água no tubo continuou em repouso, sem derramar nem um pouco pela extremidade inferior.

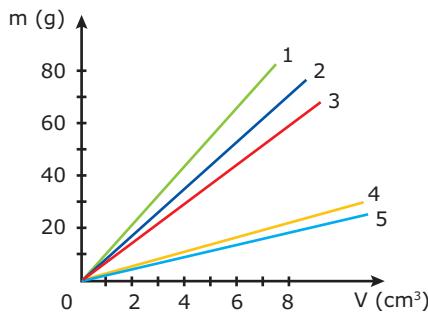
A) Avaliar a pressão do ar no interior do tubo.
B) Explicar por que a água coletada no tubo não derrama depois que esse é retirado do recipiente.

Resolução:

A) A água está em equilíbrio tanto no interior do tubo quanto dentro do recipiente. Logo, podemos afirmar que as pressões em dois pontos do interior do líquido, que se encontram em um mesmo nível, são iguais. Esse é o caso da pressão na superfície livre da água (ponto A da figura a seguir) e da pressão da água dentro do tubo, na posição em que o nível é o mesmo da superfície livre (ponto B).

A pressão no ponto A é igual à pressão atmosférica, (P_0 = 1,0 x 10^5 N/m^2, ao nível do mar). A pressão em B é a soma da pressão do ar dentro do tubo (valor pedido) com a pressão exercida pela coluna de água no tubo. Essa última parcela é dada por ρgh, em que ρ é a densidade da água (1,0 x 10^3 kg/m^3), g é a aceleração da gravidade (10 m/s^2), e h é a altura da coluna de água no tubo. O tubo tem 1 m de comprimento, de forma que 40 cm (0,40 m) é uma boa estimativa para h. Igualando as pressões em A e B e substituindo os valores citados, obtemos:

$P_B = P_A \Rightarrow P + \rho gh = P_0$

$\Rightarrow P + 1{,}0 \times 10^3 . 10 . 0{,}40 = 1{,}0 \times 10^5$

$\Rightarrow P = 0{,}96 \times 10^5$ N/m^2

Observe que o valor da pressão P é igual a 96% da pressão atmosférica. Em outras palavras, ao succionar a água, o professor reduziu 4% da pressão do ar dentro do tubo. Por isso, a pressão atmosférica, que atua na superfície livre da água do recipiente, "empurrou" o líquido para dentro do tubo. É dessa forma que conseguimos tomar uma bebida com um canudinho. De fato, é a pressão atmosférica que empurra a bebida para dentro da nossa boca.

B) Depois que o tubo é retirado do recipiente, a água não derrama pela extremidade de baixo do tubo porque a pressão atmosférica atua de baixo para cima sobre a água, impedindo-a de cair. Nessa situação, de forma semelhante àquela discutida no item (A), a pressão atmosférica que age externamente é equilibrada pela soma da pressão do ar dentro do tubo com a pressão exercida pela coluna de água.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFRGS–2006) Em uma aula de laboratório, os alunos realizam um experimento para demonstrar a relação linear existente entre a massa e o volume de diferentes cilindros maciços feitos de vidro. Em seguida, repetem o mesmo experimento com cilindros de aço, alumínio, chumbo e cobre. No gráfico a seguir, cada reta corresponde ao resultado obtido para cada um dos cinco materiais citados.

A reta que corresponde ao resultado obtido para o chumbo é a de número

A) 1.

B) 2.

C) 3.

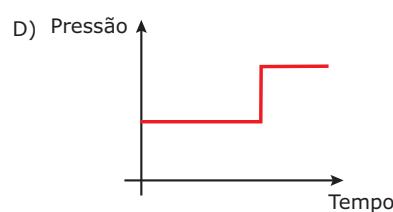
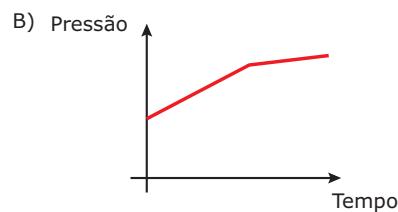
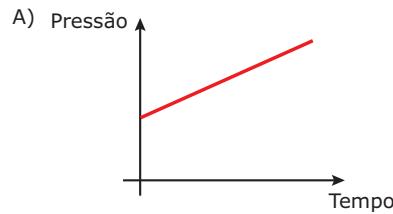
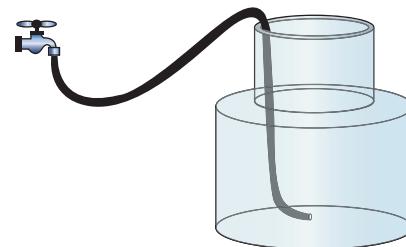
D) 4.

E) 5.

02. (UFMG–2006) José aperta uma tachinha entre os dedos, como mostrado nesta figura:

A cabeça da tachinha está apoiada no polegar e a ponta, no indicador.

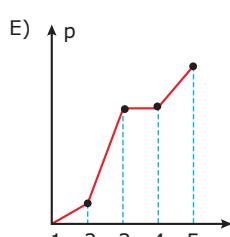
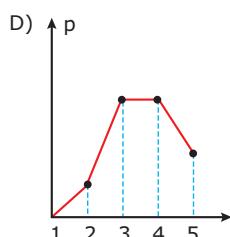
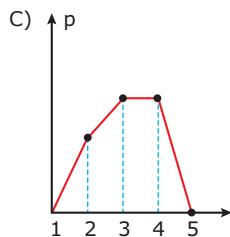
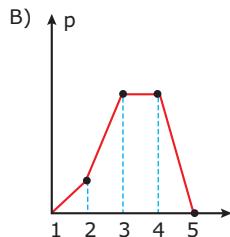
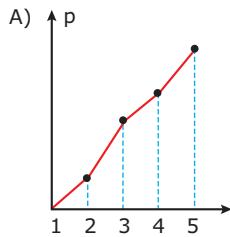
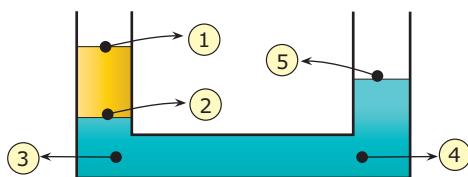
Sejam F(i) o módulo da força e p(i) a pressão que a tachinha faz sobre o dedo indicador de José. Sobre o polegar, essas grandezas são, respectivamente, F(p) e p(p).

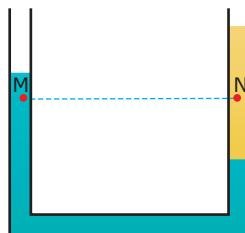
Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) F(i) > F(p) e p(i) = p(p).

B) F(i) = F(p) e p(i) = p(p).

C) F(i) > F(p) e p(i) > p(p).

D) F(i) = F(p) e p(i) > p(p).

03. (UFMG–2007) Um reservatório de água é constituído de duas partes cilíndricas, interligadas, como mostrado na figura.

A área da seção reta do cilindro inferior é maior que a do cilindro superior.

Inicialmente, esse reservatório está vazio. Em certo instante, começa-se a enchê-lo com água, mantendo-se uma vazão constante.

Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a pressão, no fundo do reservatório, em função do tempo, desde o instante em que se começa a enchê-lo até o instante em que ele começa a transbordar.

A)

B)

C)

D)

FÍSICA

04. (Cesgranrio) O tubo em U, aberto, contém mercúrio e água. Qual dos gráficos **MELHOR** indica a variação da pressão entre os pontos 1, 2, 3, 4 e 5?

A)

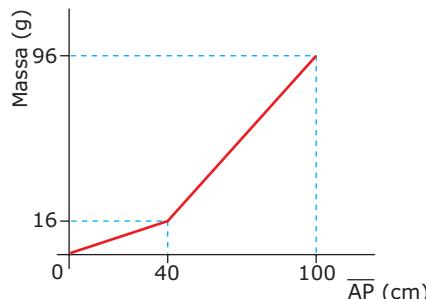
B)

C)

D)

E)

05. (PUCPR) A figura mostra um tubo em U, aberto nas duas extremidades. Esse tubo contém dois líquidos que não se misturam e que têm densidades diferentes. Sejam p_M e p_N as pressões nos pontos M e N, respectivamente. Esses pontos estão no mesmo nível, como indicado pela linha tracejada, e as densidades dos dois líquidos são tais que $d_M = 2d_N$.

Nessas condições, é **CORRETO** afirmar que

A) $p_M = 2p_N$.

B) $p_M = p_N$.

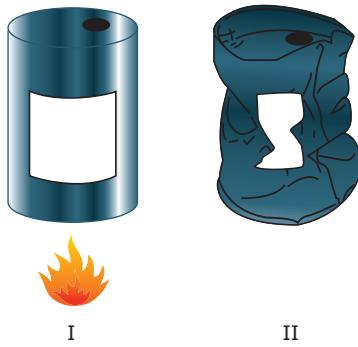
C) $p_M > p_N$.

D) $p_M < p_N$.

E) Nada se pode afirmar a respeito das pressões.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UERJ–2010) A figura a seguir representa um fio AB de comprimento igual a 100 cm, formado de duas partes homogêneas sucessivas: uma de alumínio e outra, mais densa, de cobre. Uma argola P que envolve o fio é deslocada de A para B.

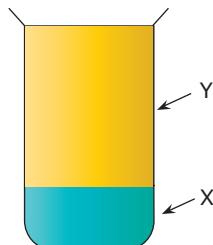
Durante esse deslocamento, a massa de cada pedaço de comprimento AP é medida. Os resultados estão representados no gráfico a seguir:

A razão entre a densidade do alumínio e a densidade do cobre é aproximadamente igual a

A) 0,1.

B) 0,2.

C) 0,3.

D) 0,4.

02. (UFMG–2007) Para se realizar uma determinada experiência,

- coloca-se um pouco de água em uma lata, com uma abertura na parte superior, destampada, a qual é, em seguida, aquecida, como mostrado na figura I;
- depois que a água ferve e o interior da lata fica totalmente preenchido com vapor, esta é tampada e retirada do fogo;
- logo depois, despeja-se água fria sobre a lata e observa-se que ela se contrai bruscamente, como mostrado na figura II.

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que, na situação descrita, a contração ocorre porque

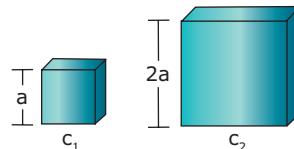
A) a água fria provoca uma contração do metal das paredes da lata.

B) a lata fica mais frágil ao ser aquecida.

C) a pressão atmosférica esmaga a lata.

D) o vapor frio, no interior da lata, puxa suas paredes para dentro.

03. (UECE) Dois líquidos não miscíveis, X e Y, são derramados sucessivamente em um vaso cilíndrico. O líquido X, de massa específica 0,8 g/cm³, é derramado primeiro, até atingir 1/4 do volume do vaso.

A seguir, o líquido Y, de massa específica 0,5 g/cm³, é derramado até encher completamente o vaso. Se m_x e m_y são as massas dos líquidos X e Y, respectivamente, a razão m_x/m_y vale

A) 8/15.

B) 4/15.

C) 8/5.

D) 4/3.

04. (PUC Rio–2010) Um avião utilizado na ponte aérea entre Rio e São Paulo é capaz de voar horizontalmente com uma carga máxima de 62 823,0 kg. Sabendo que a área somada de suas asas é de 105,4 m², é **CORRETO** afirmar que a diferença de pressão nas asas da aeronave, que promove a sustentação durante o voo, é de

(Considere g = 10,0 m/s²).

A) 2 980,2 Pa.

B) 5 960,4 Pa.

C) 6 282,3 Pa.

D) 11 920,8 Pa.

E) 12 564,6 Pa.

05. (Cesgranrio) Uma chapa de metal, homogênea e fina (de espessura constante), é cortada para formar as faces de dois cubos ocos C_1 e C_2, sendo que a aresta de C_2 é o dobro da aresta de C_1.

A densidade do cubo menor é d. Logo, a densidade do cubo maior é

A) 2d.

B) d.

C) d/2.

D) d/4.

E) d/8.

06. (UFPE) O casco de um submarino suporta uma pressão externa de até 12,0 atm sem se romper. Se, por acidente, o submarino afundar no mar, a que profundidade, em metros, o casco se romperá?

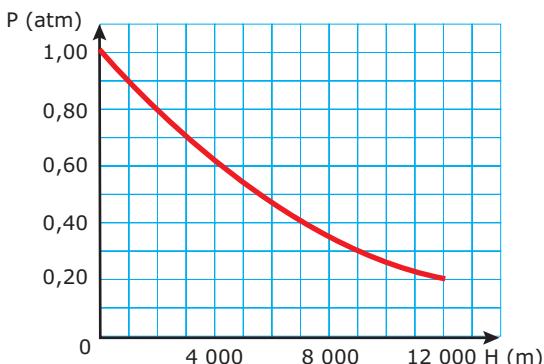
A) 100

B) 110

C) 120

D) 130

E) 140

07. (UFU-MG–2006) Ao usarem elevadores, algumas pessoas apresentam problemas nos ouvidos devido a mudanças de pressão. Se a pressão interna do tímpano não mudar durante a subida, a diminuição na pressão externa causa o aparecimento de uma força direcionada para fora do tímpano. Considere a área do tímpano de 0,6 cm², a densidade do ar admitida constante e igual a 1,3 gramas/litro, g = 10 m/s² e as pressões interna e externa do tímpano inicialmente iguais. Quando o elevador sobe 100 m, a força exercida sobre o tímpano, nas condições anteriores, seria de

A) $7,8 \times 10^{-2}$ N.

B) $9,7 \times 10^{2}$ N.

C) $7,8 \times 10^{2}$ N.

D) $9,7 \times 10^{-2}$ N.

FÍSICA

08. (UFSC) Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

01. Usando um canudinho, seria muito mais fácil tomar um refrigerante na Lua do que na Terra, porque a força de atração gravitacional na Lua é menor.

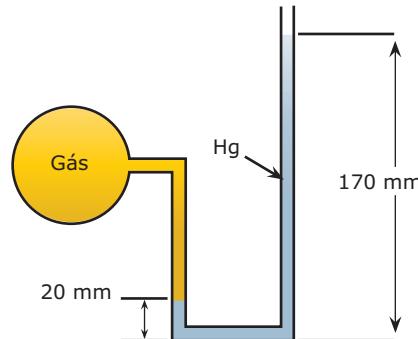
02. É possível a medida aproximada da altitude pela variação da pressão atmosférica.

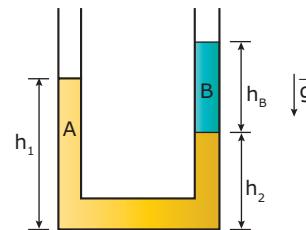
04. Uma pessoa explodiria se fosse retirada da atmosfera terrestre para o vácuo. A pressão interna do corpo seria muito maior do que a pressão externa (nula, no vácuo) e "empurraria" as moléculas para fora do corpo. Esse é um dos motivos pelos quais os astronautas usam roupas especiais para missões fora do ambiente pressurizado de suas naves.

08. Para repetir a experiência realizada por Evangelista Torricelli, comparando a pressão atmosférica com a pressão exercida por uma coluna de mercúrio, é necessário conhecer o diâmetro do tubo, pois a pressão exercida por uma coluna líquida depende do seu volume.

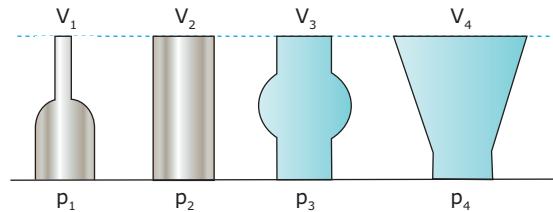
16. Vários fabricantes, para facilitar a retirada da tampa dos copos de requeijão e de outros produtos, introduziram um furo no seu centro, selado com plástico. Isso facilita tirar a tampa porque, ao retirar o selo, permitimos que o ar penetre no copo e a pressão atmosférica atue, também, de dentro para fora.

32. Quando se introduz a agulha de uma seringa numa veia do braço, para se retirar sangue, este passa da veia para a seringa devido à diferença de pressão entre o sangue na veia e o interior da seringa.

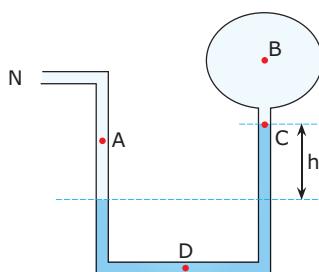
64. Sendo correta a informação de que São Joaquim se situa a uma altitude de 1 353 m e que Itajaí está ao nível do mar (altitude = 1 m), podemos concluir que a pressão atmosférica é maior em São Joaquim, já que ela aumenta com a altitude.

Soma (   )

09. (FUVEST-SP) Um avião que voa a grande altura é pressurizado para conforto dos passageiros. Para evitar sua explosão, é estabelecido o limite máximo de 0,5 atmosfera para a diferença entre a pressão interna no avião e a externa. O gráfico representa a pressão atmosférica P em função da altura H acima do nível do mar. Se o avião voa a uma altura de 7 000 metros e é pressurizado até o limite, os passageiros ficam sujeitos a uma pressão igual à que reina na atmosfera a uma altura de, aproximadamente,

A) 0 m.
B) 1 000 m.
C) 2 000 m.
D) 5 500 m.
E) 7 000 m.

10. (UEL-PR) Para medir a pressão p exercida por um gás contido num recipiente, utilizou-se um manômetro de mercúrio, obtendo-se os valores indicados na figura. A pressão atmosférica local medida por um barômetro é de 750 mmHg. O valor de p, em mmHg, é

A) 150.
B) 170.
C) 750.
D) 900.
E) 940.

11. (VUNESP) A figura mostra dois líquidos, A e B, incompressíveis e não miscíveis, em equilíbrio num tubo em forma de U, de seção constante, aberto nas extremidades.

Se a densidade do líquido A for duas vezes maior que a do líquido B, a altura h_2, indicada na figura, será

A) $h_1 - (h_B/2)$.
B) $h_1 - h_B$.
C) $h_1 - 2h_B$.
D) $2h_1 - h_B$.
E) $(h_1/2) - h_B$.

12. (UFMG) Os fundos dos vasos V_1, V_2, V_3 e V_4 têm a mesma área. Os vasos V_1 e V_2 estão cheios de mercúrio e V_3 e V_4, de água, até a mesma altura, conforme ilustra a figura.

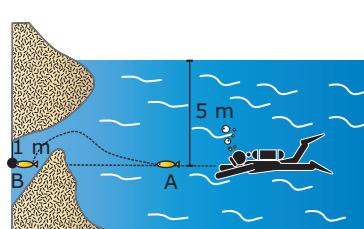
Quanto às pressões p_1, p_2, p_3 e p_4, exercidas pelos líquidos nos fundos dos vasos V_1, V_2, V_3 e V_4, respectivamente, pode-se afirmar que

A) $p_4 > p_3 > p_2 > p_1$.
B) $p_2 > p_1$ e $p_4 > p_3$.
C) $p_1 > p_2$ e $p_3 > p_4$.
D) $p_1 = p_2$ e $p_3 = p_4$.
E) $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$.

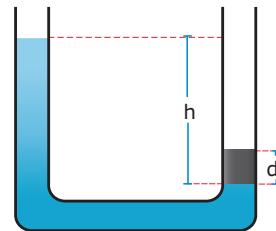
13. (UFV-MG) O recipiente ilustrado na figura contém água em desnível e está aberto à atmosfera em N.

A pressão em B é

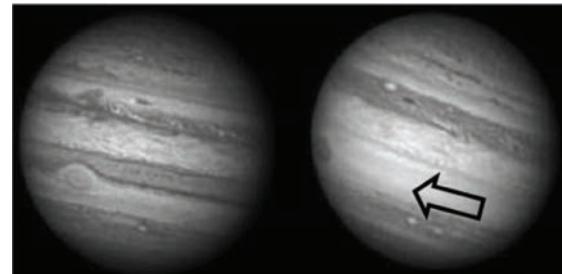
A) maior que em A.
B) maior que em C.
C) maior que em D.
D) igual à pressão em A.
E) menor que em A.

14. (PUC Minas) Dois tubos iguais contêm: um, azeite de oliva, e o outro, água. Os líquidos têm o mesmo peso, mas alcançam as alturas de 50 cm e 46 cm, respectivamente. **DETERMINE** a densidade do azeite de oliva.

Dado: densidade da água = 1 g/cm^3.

15. (UnB-DF) Ao nível do mar, o experimento de Torricelli para medir a pressão atmosférica usando-se o mercúrio metálico, cuja densidade é igual a 13,6 g/cm^3, apresenta uma coluna de mercúrio de 76 cm. Em um local de Brasília, situado 1 000 m acima do nível do mar, o mesmo experimento apresenta uma coluna de mercúrio com altura igual a 67 cm. **CALCULE**, em decímetros, a altura da coluna nesse local de Brasília se em vez do mercúrio metálico fosse usado o mercurocromo, cuja densidade é igual a 0,99 g/cm^3. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

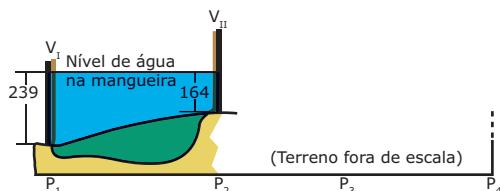
16. (UFMG) Um recipiente cilíndrico, cuja base tem área igual a 0,20 m^2, está cheio de água até a altura de 0,80 m. Considerando g = 10 m/s^2 e a densidade da água igual a 1,0 x 10^3 kg/m^3, **DETERMINE** o valor da pressão hidrostática no fundo do recipiente.

17. (Unicamp-SP) Um mergulhador persegue um peixe a 5,0 m abaixo da superfície de um lago. O peixe foge da posição A e se esconde em uma gruta na posição B, conforme mostra a figura a seguir. A pressão atmosférica na superfície da água é igual a p_0 = 1,0 x 10^5 N/m^2.

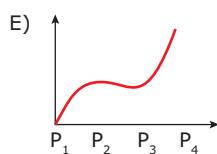
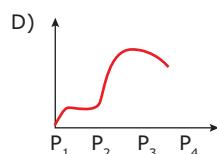
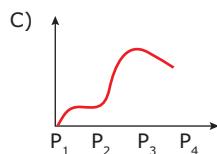
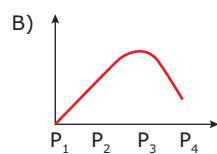
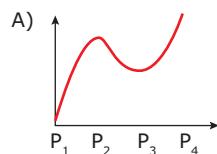
Adote g = 10 m/s^2.

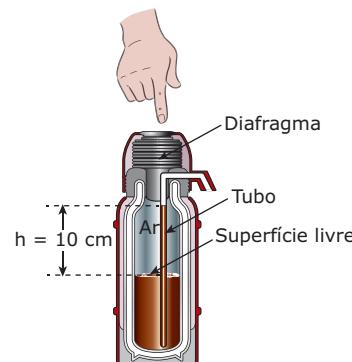
A) Qual a pressão sobre o mergulhador?
B) Qual a variação de pressão sobre o peixe nas posições A e B?

18. (UFC) A figura a seguir representa um tubo aberto em forma de U, com área da seção reta A, que contém um líquido de densidade ρ_L. Dentro do tubo, no seu ramo direito, há um objeto de altura d, de área de seção reta igual à do tubo e de densidade $\rho_0 = 8\rho_L$, que repousa sobre a superfície do líquido.

No ramo esquerdo do tubo, a superfície livre do líquido está a uma altura h acima da sua superfície no ramo direito. **CALCULE** a razão h/d quando o sistema está em equilíbrio. Despreze qualquer atrito.

SEÇÃO ENEM

01. Júpiter, conhecido como gigante gasoso, perdeu uma de suas listras mais proeminentes, deixando o seu hemisfério sul estranhamente vazio. Observe a região em que a faixa sumiu, destacada pela seta.

A aparência de Júpiter é tipicamente marcada por duas faixas escuras em sua atmosfera – uma no hemisfério norte e outra no hemisfério sul. Como o gás está constantemente em movimento, o desaparecimento da faixa no planeta relaciona-se ao movimento das diversas camadas de nuvens em sua atmosfera. A luz do Sol, refletida nessas nuvens, gera a imagem que é captada pelos telescópios, no espaço ou na Terra.

O desaparecimento da faixa sul pode ter sido determinado por uma alteração

A) na temperatura da superfície do planeta.
B) no formato da camada gasosa do planeta.
C) no campo gravitacional gerado pelo planeta.
D) na composição química das nuvens do planeta.
E) na densidade das nuvens que compõem o planeta.

02. (Enem–2004) Para medir o perfil de um terreno, um mestre de obras utilizou duas varas (V_I e V_{II}), iguais e igualmente graduadas em centímetros, às quais foi acoplada uma mangueira plástica transparente, parcialmente preenchida por água (figura a seguir). Ele fez 3 medições que permitiram levantar o perfil da linha que contém, em sequência, os pontos P_1, P_2, P_3 e P_4. Em cada medição, colocou as varas em dois diferentes pontos e anotou suas leituras na tabela a seguir. A figura representa a primeira medição entre P_1 e P_2.

MEDIÇÃO	VARA I		VARA II		DIFERENÇA ($L_I - L_{II}$) (cm)
	PONTO	LEITURA L_I(cm)	PONTO	LEITURA L_{II}(cm)	
1ª	P_1	239	P_2	164	75
2ª	P_2	189	P_3	214	–25
3ª	P_3	229	P_4	174	55

Ao preencher completamente a tabela, o mestre de obras determina o seguinte perfil para o terreno:

A)

B)

C)

D)

E)

03. A figura mostra uma garrafa térmica de pressão, na qual a tampa, ao ser pressionada pelo dedo da pessoa, gera um acréscimo de pressão do ar sobre a superfície livre do café, permitindo a saída da bebida através de um tubo vertical.

Ao nível do mar, a pressão atmosférica vale 1 atm. Esse valor equivale aproximadamente à pressão exercida por uma coluna de 10 metros de água. Nessas condições, para fazer um esforço mínimo, o suficiente para o café sair da garrafa térmica mostrada na figura, a pressão na superfície livre deve ser

A) exatamente igual a 0,9 atm.
B) exatamente igual a 1,0 atm.
C) ligeiramente maior que 1,0 atm.
D) exatamente igual a 1,1 atm.
E) um pouco maior que 1,1 atm.

GABARITO

Fixação

01. A 02. D 03. C 04. B 05. D

Propostos

01. C
02. C
03. A
04. B
05. C
06. B
07. A
08. Soma = 54
09. B
10. D
11. A
12. D
13. E
14. 0,92 g/cm³
15. 92 dm
16. 8×10^3 Pa
17. A) $1,5 \times 10^5$ N/m²
    B) Zero
18. h/d = 8

Seção Enem

01. E 02. A 03. C

FÍSICA

MÓDULO 12 FRENTE B

Teoremas de Pascal e Arquimedes

No módulo anterior, estudamos o Princípio Fundamental da Hidrostática, representado pela equação de Stevin, com a qual podemos calcular as pressões exercidas por um líquido em equilíbrio. Neste módulo, discutiremos outros dois pilares da Hidrostática, os Princípios de Pascal e de Arquimedes, bem como uma série de aplicações sobre esses dois fundamentos.

PRINCÍPIO DE PASCAL

O francês Blaise Pascal, que viveu no século XVI, fez importantes descobertas na Matemática e na Física. No campo da Mecânica dos Fluidos, a sua contribuição mais relevante, hoje conhecida como Princípio de Pascal, pode ser assim enunciada:

> A pressão exercida sobre um líquido em equilíbrio se transmite integralmente a todos os pontos do líquido e às paredes do recipiente no qual o líquido está confinado.

A figura 1 ilustra uma experiência simples para demonstrar o Princípio de Pascal. Nela, temos um cilindro cheio de líquido, um balão de borracha conectado ao cilindro e cinco manômetros também conectados ao cilindro em diferentes posições. Dentro do balão de borracha, há um pouco de ar aprisionado. Esse ar exerce uma pressão sobre a superfície do líquido. Apertando o balão, a pressão exercida pelo ar sobre a superfície do líquido aumenta. Os cinco manômetros, que se acham distribuídos em diferentes posições nas paredes do cilindro, registram o mesmo aumento de pressão. É justamente essa transmissão integral da pressão a todos os pontos do líquido que constitui a essência do Princípio de Pascal.

Figura 1: O aumento de pressão exercida sobre a superfície do líquido é transmitido a todos os outros pontos do líquido.

As máquinas hidráulicas, como elevadores e prensas hidráulicas, funcionam com base no Princípio de Pascal. Uma máquina hidráulica é um dispositivo capaz de multiplicar o efeito de uma força por meio da transmissão da pressão exercida por essa força em um líquido. Para explicar o funcionamento dessas máquinas, vamos considerar a figura 2, que representa um elevador hidráulico, constituído por dois cilindros dotados de êmbolos, interligados e cheios de óleo.

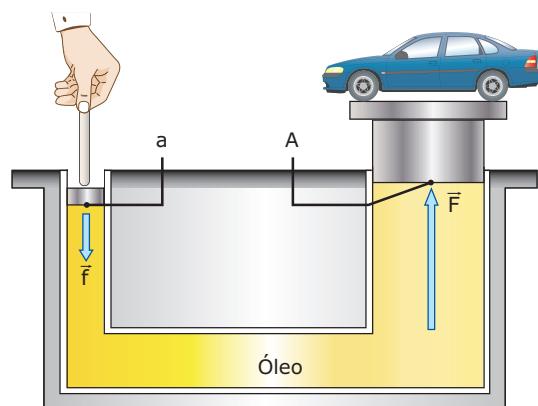



Figura 2: A pressão exercida pela pessoa é transmitida pelo óleo para a outra extremidade do elevador.

De acordo com o Princípio de Pascal, a pressão exercida pela pessoa é transmitida integralmente através do óleo para o outro lado do elevador. Por isso, a razão entre a força exercida pela pessoa e a área do êmbolo menor, f/a, deve ser igual à razão entre a força que aparece no lado oposto e a área do êmbolo maior, F/A. Explicitando a força f, obtemos:

$$\frac{F}{A} = \frac{f}{a} \Rightarrow f = F\frac{a}{A}$$

Para erguer o carro da figura 2 com velocidade constante, a força $\vec{F}$ exercida pelo êmbolo deve ter a mesma intensidade que o peso do carro. Nessas condições, se a massa do carro for igual a uma tonelada, então F deve ser igual a 1 000 kgf. Considerando as áreas A = 2,0 m² e a = 0,020 m², a intensidade da força $\vec{f}$ necessária para erguer o carro será:

$$f = F\frac{a}{A} = 1\,000\text{ kgf}\,\frac{0{,}020\text{ m}^2}{2{,}0\text{ m}^2} = 10\text{ kgf}$$

Note que o módulo da força $\vec{f}$ é 100 vezes menor do que o de $\vec{F}$, porque a área A é 100 vezes maior do que a área a. Na prática, uma máquina com um quociente A/a muito

grande não é viável, pois o óleo, sendo incompressível, deve apresentar os mesmos deslocamentos volumétricos nos dois cilindros do elevador. Assim, como os cilindros apresentam áreas diferentes, os seus deslocamentos lineares são diferentes. Nesse exemplo, para que o carro fosse erguido 1,0 m, o êmbolo menor deveria ser abaixado 100 metros. É claro que um deslocamento tão grande assim é impraticável. Portanto, nas máquinas hidráulicas reais, o quociente A/a é limitado. Ainda que isso comprometa um pouco a vantagem mecânica do sistema, o deslocamento do êmbolo em que $\vec{f}$ atua não é exageradamente grande. Em algumas máquinas hidráulicas, há uma alavanca atuando sobre o êmbolo menor. A vantagem mecânica dessa alavanca, associada à da máquina hidráulica, permite a obtenção de uma vantagem mecânica global praticável e significativa.

Podemos, também, usar o Princípio da Conservação da Energia para explicar por que existe uma diferença entre os deslocamentos lineares dos êmbolos em uma máquina hidráulica. De acordo com esse princípio, o trabalho realizado pela força no lado do êmbolo maior (F.d) deve ser igual ao trabalho realizado pela força no outro lado (f.D). Como F é maior do que f, então D deve ser maior do que d. No exemplo discutido anteriormente, como F é 100 vezes maior do que f, D deve ser 100 vezes maior do que d.

PARA REFLETIR

Por que você, atrás de uma barragem, seria capaz de reter toda a água da represa, simplesmente tampando com o dedo um buraco existente na barragem?

PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

Empuxo

Quando você se encontra dentro de uma piscina com água, o líquido exerce sobre seu corpo uma força denominada empuxo que age de baixo para cima sobre você. Por isso, embora seu peso continue sendo exatamente o mesmo, você se sente mais leve dentro da água do que fora dela. O grego Arquimedes, que viveu por volta do ano 400 a.C., foi o primeiro a estudar esse fenômeno, formulando o que hoje conhecemos como o Princípio de Arquimedes, cujo enunciado é o seguinte:

Todo corpo imerso em um fluido (líquido ou gás) sofre a ação de uma força de empuxo exercida pelo fluido, cujo sentido é de baixo para cima e cujo módulo é igual ao módulo do peso do fluido deslocado pelo corpo.

Uma experiência simples para comprovar o Princípio de Arquimedes está ilustrada na figura 3. Na primeira etapa da experiência, o peso de uma pedra é registrado por meio de um dinamômetro. Digamos que o valor obtido seja P = 3,5 N. Na sequência, a pedra é mergulhada em um recipiente com água. Nessa condição, o dinamômetro registra um valor menor, por exemplo, P_A = 3,0 N, que é o modulo do peso aparente da pedra. É claro que o peso real da pedra continua sendo igual a 3,5 N. Porém, a água exerce uma força de empuxo de módulo E = 0,50 N sobre a pedra, de forma que a força exercida pelo dinamômetro sobre a pedra, $P_A = P - E$, possui módulo igual a 3,0 N. Por último, obtemos o resultado mais importante dessa experiência: a água coletada no recipiente menor (água deslocada pela pedra) possui um peso de 0,50 N, que é exatamente o módulo da força de empuxo, obtido pela diferença entre as duas leituras do dinamômetro.

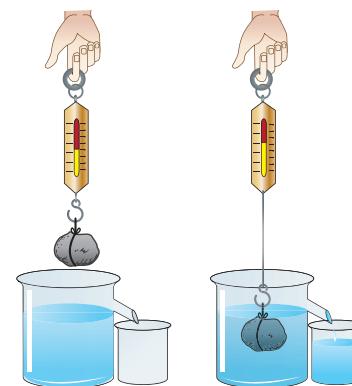



Figura 3: O módulo do empuxo (calculado como a diferença das leituras no dinamômetro) é igual ao módulo de peso do líquido deslocado.

Arquimedes realizou experiências parecidas com a descrita anteriormente quando tentava descobrir uma maneira de calcular a força de empuxo exercida sobre objetos imersos na água. Muitos séculos depois, o Princípio de Arquimedes foi demonstrado teoricamente a partir da equação de Stevin. Considere um bloco de altura h e seção transversal de área A, imerso em um líquido de densidade ρ, como mostra a figura 4.

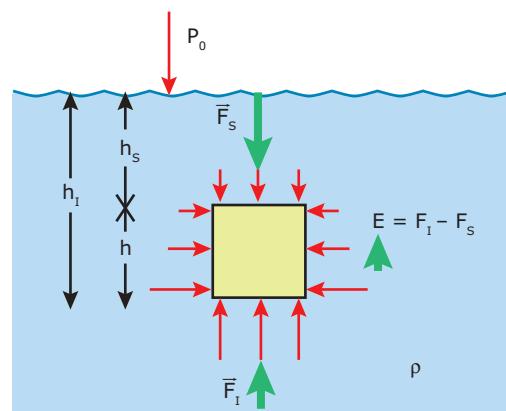



Figura 4: O empuxo se deve à diferença entre as forças exercidas pelo líquido na face inferior e superior do objeto.

De acordo com a equação de Stevin, a pressão exercida pelo líquido aumenta com a profundidade. Por isso, nas faces laterais opostas do bloco, as pressões se cancelam. Entretanto, o mesmo não acontece nas faces horizontais, pois a pressão exercida sobre a face inferior é maior do que a pressão exercida sobre a face superior, de modo que a força exercida pelo líquido de baixo para cima é maior do que a força de cima para baixo. Assim, há uma força resultante vertical, voltada para cima (o empuxo), atuando sobre o bloco. Os módulos das forças exercidas pelo líquido sobre as faces inferior e superior do bloco são:

$$F_S = (P_0 + \rho g h_S).A \quad \text{e} \quad F_I = (P_0 + \rho g h_I).A$$

Nessas equações, h_S e h_I são as profundidades do líquido nos níveis onde situam-se as faces superior e inferior, respectivamente. A diferença entre essas forças representa o empuxo do líquido sobre o cilindro:

$$E = F_I - F_S = \rho g A(h_I - h_S)$$

Note que $h_I - h_S$ é a altura h do bloco, de forma que o produto A.h é o volume V do bloco. Como esse é também o volume do líquido deslocado, concluímos que ρ.V é a massa do líquido deslocado, e que o módulo do empuxo E = ρ.V.g é igual ao módulo de peso do líquido deslocado, finalizando a nossa demonstração.

A seguir, vamos discutir as condições nas quais um corpo afunda ou não em um líquido.

PARA REFLETIR

Uma peça de ferro faria um bloco de madeira flutuar mais baixo na água caso fosse presa debaixo do bloco ou sobre ele?

Condições de flutuação

Imagine que você mergulha completamente um objeto de densidade ρ_O dentro de um líquido de densidade ρ_L. Em seguida, soltando o objeto, esse poderá afundar no líquido, permanecer no mesmo lugar em que foi colocado ou ainda subir e emergir na superfície do líquido. As intensidades do peso do objeto e do empuxo exercido pelo líquido definirão que tipo de evento ocorrerá com o objeto. Para discutirmos mais detalhadamente esse problema, vamos escrever o peso do objeto e o empuxo sobre ele usando as seguintes expressões:

$$P_O = m_O g = \rho_O V_O g \ ; \ E = m_{LD} g = \rho_L V_{LD} g$$

Nessas expressões, m_O e m_{LD} são as massas do objeto e do líquido deslocado, V_O e V_{LD} são os volumes do objeto e do líquido deslocado, e g é a aceleração da gravidade.

Vamos analisar separadamente cada uma das situações que podem ocorrer com o objeto.

Caso I: O objeto afunda

Para afundar, o módulo do peso do objeto deve ser maior do que o módulo do empuxo, de modo que, após ser solto, a resultante das forças que atuam sobre o objeto será dirigida para baixo. Como o objeto está totalmente imerso no líquido, temos $V_O = V_{LD}$. Assim, para o peso ser maior do que o empuxo, devemos ter $\rho_O > \rho_L$. Esse resultado é bastante intuitivo, já que pode ser observado em várias situações do nosso dia a dia, como o afundamento de uma pedra ou de uma esfera de chumbo jogadas na água.

Caso II: O objeto sobe

Para o objeto subir, o módulo de seu peso deve ser menor do que o módulo do empuxo, pois, assim, a resultante das forças que atuam sobre o objeto será dirigida para cima. Isso ocorre porque $\rho_O < \rho_L$. Um exemplo desse caso é o movimento de subida de um pedaço de madeira abandonado dentro da água. Chegando à superfície, o objeto passa a flutuar. Isso significa que o módulo do empuxo diminui, tornando-se igual ao módulo do peso do objeto, de forma que a resultante de forças seja nula. O motivo dessa diminuição do empuxo é que o objeto, ao flutuar com apenas uma parte submersa, desloca um volume de líquido menor do que aquele que era deslocado durante o movimento de subida.

Uma consequência muito importante que tiramos da igualdade entre o empuxo ($E = m_{LD}g$) e o peso de um objeto flutuante ($P_O = m_O g$) é que a massa m_O do objeto é igual à massa m_{LD} do líquido deslocado. A figura 5 mostra uma experiência simples para comprovar essa igualdade. Um bloco de madeira é colocado cuidadosamente em um recipiente com água até o topo, que está sobre uma balança. A água deslocada é coletada por um recipiente menor. Observe que a leitura da balança não se altera com a colocação do bloco de madeira, já que a massa de água que foi deslocada é exatamente igual à massa do objeto flutuante.

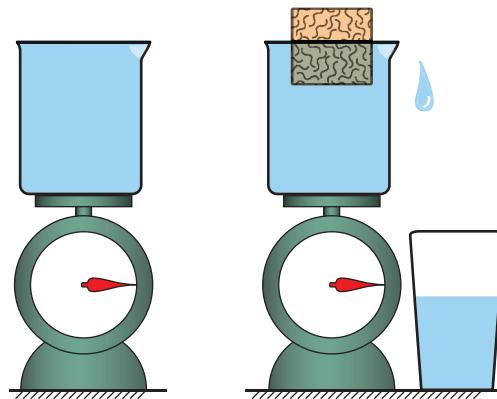



Figura 5: A massa de líquido deslocada é igual à massa do objeto flutuante.

Podemos calcular a densidade de um objeto flutuante a partir da densidade do líquido e de medições simples do volume do objeto e do volume submerso, sendo esse último nada mais do que o volume de líquido deslocado. Como as massas do objeto e da água deslocada são iguais, podemos expressar a densidade do objeto por meio da seguinte relação:

$$m_O = m_{LD} \Rightarrow \rho_O V_O = \rho_L V_{LD} \Rightarrow \rho_O = \rho_L \frac{V_{LD}}{V_O}$$

Esse resultado matemático pode ser expresso com as seguintes palavras: a densidade de um objeto flutuante é uma fração da densidade do líquido, o que corresponde à razão entre o volume submerso e o volume total. Por exemplo, na figura 5, se o volume do objeto for V_O = 50 cm³ e o volume submerso for V_{LD} = 30 cm³, então a densidade da madeira vale 60% da densidade da água, uma vez que 30 cm³ é 60% de 50 cm³.

Caso III: O objeto permanece parado

Quando um objeto é abandonado dentro de um líquido e permanece no mesmo lugar, significa que a resultante de forças sobre ele é nula. Por isso, concluímos, para esse caso, que o módulo peso do objeto é igual ao módulo do empuxo. Para isso ocorrer, temos $\rho_O = \rho_L$. Um exemplo dessa situação ocorre com um submarino em repouso ou em movimento horizontal submerso no mar. Embora o casco seja de aço, a densidade de um submarino é uma média ponderada entre a densidade do aço, do ar, da água e de muitos outros corpos existentes na embarcação. Na verdade, o peso e a densidade de um submarino podem ser alterados por meio da variação da massa em um tanque de lastro, que pode ser preenchido com uma massa maior ou menor de água. Dependendo do valor dessa massa, a embarcação pode emergir, submergir ou manter-se em um mesmo nível dentro do mar. Observe a figura 6, que mostra um submarino em corte. O tanque de ar comprimido e a combinação certa de aberturas e fechamentos de válvulas permitem encher ou esvaziar o tanque de lastro.

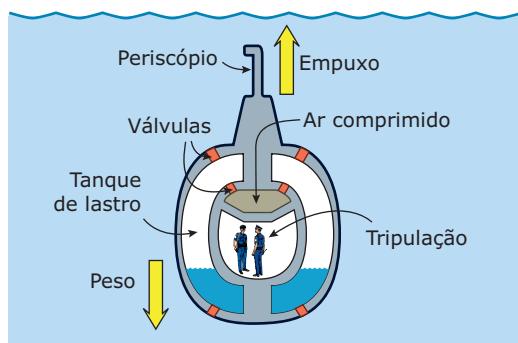
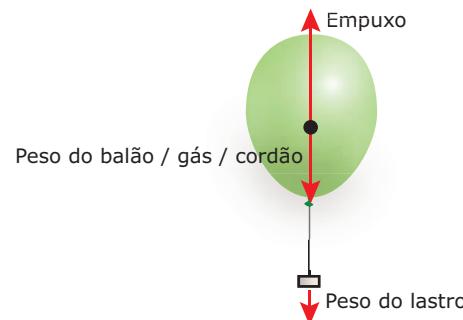



Figura 6: A variação do peso do submarino governa a dirigibilidade vertical da embarcação.

O Princípio de Arquimedes pode ser usado tanto para corpos mergulhados em líquidos quanto para corpos imersos em um gás, como um balão que se move na atmosfera da Terra. O Exercício Resolvido 01, apresentado a seguir, aborda essa situação.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Para impedir que um balão de gás leve escapasse da mão do seu filho, um pai amarrou o cordão do balão na ponta do dedo do garoto. Uma ideia melhor seria colocar um pequeno objeto de lastro na ponta do cordão. Assim, segurando o objeto, o garoto sentiria o balão flutuando preso em sua mão. Caso o garoto soltasse o objeto, o conjunto balão / lastro cairia lentamente em direção ao solo. Calcular a massa mínima que esse objeto deve ter para impedir a subida do balão, considerando os seguintes dados:

massa do balão / gás / cordão: m = 4,0 x 10^{-3} kg;

volume do balão: V = 5,0 L = 5,0 x 10^{-3} m³;

Densidade do ar atmosférico: ρ_{atm} = 1,2 kg/m³;

Aceleração da gravidade: g = 10 m/s².

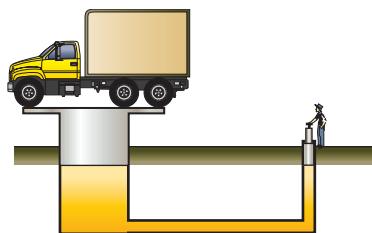
Resolução:

A figura a seguir mostra as forças atuantes sobre o sistema. Para o sistema ficar em repouso, o módulo do empuxo exercido pelo ar atmosférico sobre o balão deve ser igual à soma do módulo do peso do conjunto balão / gás / cordão com o módulo do peso do lastro.

O peso do conjunto vale:

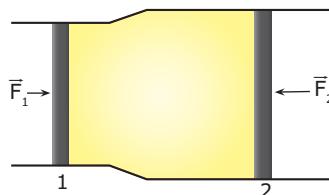
$$P = mg = 4,0 \times 10^{-3}.10 = 4,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

O empuxo da atmosfera sobre o balão vale:

$$E = \rho_{atm} Vg = 1,2.5,0 \times 10^{-3}.10 = 6,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Portanto, o peso do lastro deve ser de:

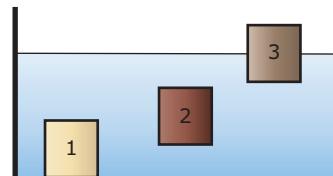
$$P_L = E - P = (6,0 - 4,0) \times 10^{-2} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Esse peso corresponde a uma massa de 2,0 x 10^{-3} kg, ou seja, uma massa de apenas 2,0 gramas. Esse valor é muito pequeno, de maneira que o fato de segurar o lastro com a mão não gera nenhum desconforto para o garoto.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFV-MG–2009) A figura a seguir ilustra uma pessoa equilibrando um caminhão por meio de um elevador hidráulico. O caminhão tem 10 toneladas de massa e está apoiado sobre um pistão cuja a área é de 6 m^2. Sabendo que a área do pistão no qual a pessoa atua é de 30 cm^2, é **CORRETO** afirmar que o valor do módulo da força que esta pessoa exerce sobre o pistão é de

Considere a aceleração da gravidade local g = 10 m/s^2.

A) 50 N.
B) 150 N.
C) 200 N.
D) 500 N.

02. (UFES) A tubulação da figura a seguir contém um líquido incompressível que está retido pelo êmbolo 1 (de área igual a 10,0 cm^2) e pelo êmbolo 2 (de área igual a 40,0 cm^2). Se a força $\vec{F}_1$ tem módulo igual a 2,0 N, a força $\vec{F}_2$, que mantém o sistema em equilíbrio, tem módulo igual a

A) 0,5 N.
B) 2,0 N.
C) 8,0 N.
D) 500,0 N.
E) 800,0 N.

03. (PUC RS) Um objeto flutua na água com metade do seu volume imerso, conforme indica a figura.

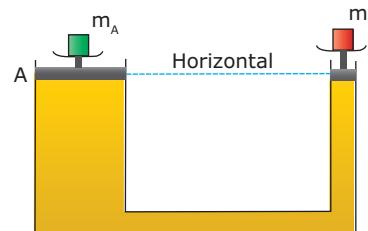
A respeito desse experimento, pode-se afirmar que

A) o empuxo da água sobre o objeto tem intensidade igual à metade do peso do objeto.
B) o volume da água deslocada pelo objeto é igual ao volume do objeto.
C) a massa da água deslocada é igual à metade da massa do objeto.
D) o peso da água deslocada tem intensidade igual ao peso do objeto.
E) o empuxo tem intensidade igual à metade do peso da água deslocada.

04. (Unimontes-MG) Na figura a seguir, estão representados os blocos 1, 2 e 3, de respectivas densidades ρ_1, ρ_2, ρ_3, em um tanque com água, de densidade ρ_A. Os blocos estão em repouso.

Considere os seguintes conjuntos de relações entre a densidade de cada bloco e a da água do tanque:

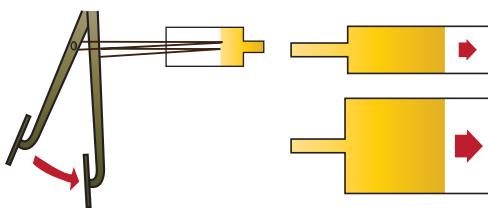
I. $\rho_1 > \rho_A$, $\rho_2 > \rho_A$, $\rho_3 < \rho_A$
II. $\rho_1 = \rho_A$, $\rho_2 = \rho_A$, $\rho_3 < \rho_A$
III. $\rho_1 > \rho_A$, $\rho_2 = \rho_A$, $\rho_3 < \rho_A$

Marque a alternativa que indica o(s) conjunto(s) cujas relações entre as densidades estão **CORRETAS**, de acordo com a situação descrita.

A) I, apenas
B) II, apenas
C) II e III, apenas
D) I e III, apenas

05. (PUC Minas) Um bloco de madeira flutua em equilíbrio numa porção de água, com apenas uma parte de seu volume mergulhada. Sejam ρ_A a densidade da água, ρ_M a densidade da madeira que constitui o bloco, V_E o volume da porção do bloco que está acima do nível da água (parte emersa) e V o volume total do bloco.

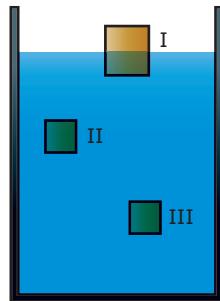
A razão V_E/V é

A) ρ_M/ρ_A.
B) $(\rho_A - \rho_M)/\rho_A$.
C) $(\rho_A - \rho_M)/\rho_M$.
D) ρ_A/ρ_M.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (FUVEST-SP) Considere o arranjo da figura a seguir, em que um líquido está confinado na região delimitada pelos êmbolos A e B, de áreas a = 80 cm^2 e b = 20 cm^2, respectivamente.

O sistema está em equilíbrio. Despreze os pesos dos êmbolos e os atritos. Se m_A = 4,0 kg, qual o valor de m_B?

A) 4 kg
B) 16 kg
C) 1 kg
D) 8 kg
E) 2 kg

02. (UFCG-PB–2007) As figuras a seguir mostram duas partes de um sistema de freio hidráulico.

Disponível em: <http://www.oficinaecia.com.br> (Adaptação).

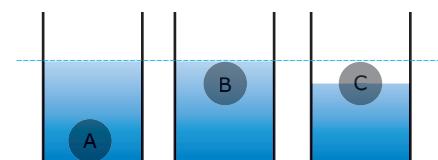
Ao pisar no pedal, o motorista ou a motorista exerce uma força sobre o fluido no cilindro a ele ligado, pondo o sistema em funcionamento. Sobre o funcionamento do sistema é **CORRETO** afirmar que

A) o módulo da força exercida sobre o pistão ligado ao pedal é igual ao módulo da força exercida por qualquer um dos pistões à direita.

B) para uma força exercida sobre o pistão ligado ao pedal, entre as forças exercidas pelos pistões da direita, a de maior módulo será exercida pelo de menor área.

C) para uma força exercida sobre o pistão ligado ao pedal, entre as forças exercidas pelos pistões da direita, a de maior módulo será exercida pelo de maior área.

D) a pressão exercida sobre o pistão pelo pedal é menor do que a pressão exercida sobre qualquer um dos pistões da direita.

E) o trabalho realizado sobre o pistão ligado ao pedal é muito maior que a soma dos trabalhos realizados sobre os pistões da direita.

03. (UFMG) Ana lança três caixas – I, II e III –, de mesma massa, dentro de um poço com água. Elas ficam em equilíbrio nas posições indicadas nesta figura:

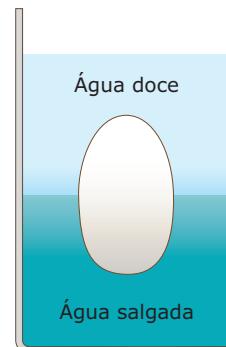
Sejam E_I, E_{II} e E_{III} os módulos dos empuxos sobre, respectivamente, as caixas I, II e III. Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $E_I > E_{II} > E_{III}$.

B) $E_I < E_{II} = E_{III}$.

C) $E_I = E_{II} = E_{III}$.

D) $E_I > E_{II} = E_{III}$.

04. (UFV-MG–2009) Três vasilhames idênticos contêm um mesmo volume de água. Dentro de cada um há um corpo em equilíbrio hidrostático, conforme mostra a figura a seguir. Com relação aos módulos dos empuxos E_A, E_B e E_C que a água exerce nos corpos A, B e C, respectivamente, é **CORRETO** afirmar que

A) $E_A > E_B > E_C$.

B) $E_A < E_B = E_C$.

C) $E_A = E_B > E_C$.

D) $E_A = E_B = E_C$.

05. (CEFET-MG–2010) Um joalheiro é solicitado a verificar se uma joia é feita de ouro puro, ou se é uma liga de ouro e prata, como na clássica experiência de Arquimedes. Ao medir o peso desse objeto no ar e depois totalmente mergulhado em água, obteve-se, respectivamente, 2,895 N e 2,745 N. Ele conclui que a joia é __________, com __________ de massa de ouro.

Considere a densidade da água, da prata e do ouro iguais a 1,0 g/cm³, 10,5 g/cm³ e 19,3 g/cm³, respectivamente.

A) uma liga; 15,0 g

B) uma liga; 28,0 g

C) de ouro puro; 43,0 g

D) de ouro puro; 274,5 g

E) de ouro puro; 289,5 g

06. (FGV-SP–2010) Quando você coloca um ovo de galinha dentro de um recipiente contendo água doce, observa que o ovo vai para o fundo, lá permanecendo submerso. Quando, entretanto, você coloca o mesmo ovo dentro do mesmo recipiente agora contendo água saturada de sal de cozinha, o ovo flutua parcialmente. Se, a partir dessa última situação, você colocar suavemente, sem agitação, água doce sobre a água salgada, evitando que as águas se misturem, o ovo, que antes flutuava parcialmente, ficará completamente submerso, porém, sem tocar o fundo.

Com respeito a essa última situação, analise:

I. A densidade da água salgada é maior que a do ovo que, por sua vez, tem densidade menor que a da água doce.

II. O empuxo exercido sobre o ovo é uma força que se iguala, em módulo, ao peso do volume de água doce e salgada que o ovo desloca.

III. A pressão atmosférica afeta diretamente o experimento, de tal forma que, quando a pressão atmosférica aumenta, mesmo que a água se comporte como um fluido ideal, o ovo tende a ficar mais próximo do fundo do recipiente.

É **CORRETO** o contido em

A) I, apenas.
B) II, apenas.
C) I e III, apenas.
D) II e III, apenas.
E) I, II e III.

07. (UFMG) A figura I mostra uma vasilha, cheia de água até a borda, sobre uma balança. Nessa situação, a balança registra um peso P_1.

Um objeto de peso P_2 é colocado nessa vasilha e flutua, ficando parcialmente submerso, como mostra a figura II. Um volume de água igual ao volume da parte submersa do objeto cai para fora da vasilha.

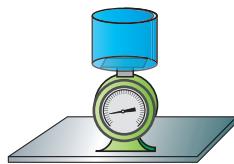
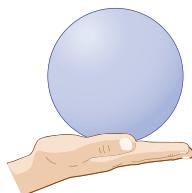



Figura I Figura II

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que, na figura II, a leitura da balança é

A) igual a P_1.
B) igual a $P_1 + P_2$.
C) maior que P_1 e menor que $P_1 + P_2$.
D) menor que P_1.

08. (UERJ–2010) Uma pessoa totalmente imersa em uma piscina sustenta, com uma das mãos, uma esfera maciça de diâmetro igual a 10 cm, também totalmente imersa. Observe a ilustração.

A massa específica do material da esfera é igual a 5,0 g/cm^3 e a da água da piscina é igual a 1,0 g/cm^3. A razão entre a força que a pessoa aplica na esfera para sustentá-la e o peso da esfera é igual a

A) 0,2. B) 0,4. C) 0,8. D) 1,0.

09. (UFMG) De uma plataforma com um guindaste, faz-se descer lentamente e com velocidade constante um bloco cilíndrico de concreto para dentro da água.

Figura I

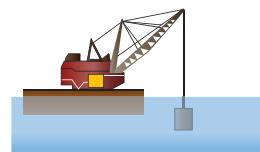
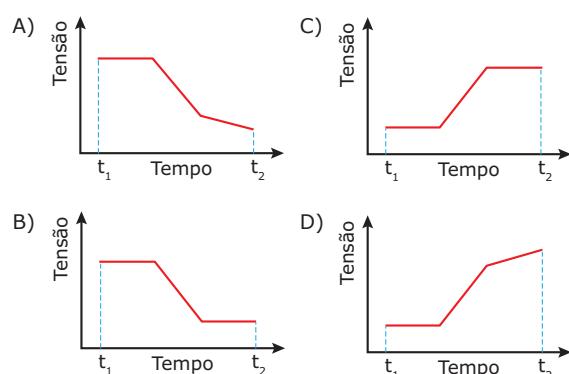
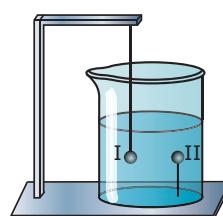
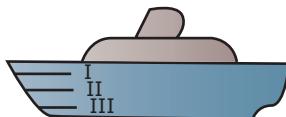



Figura II

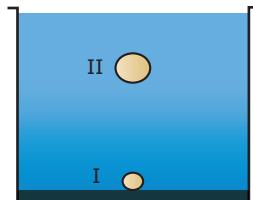
Na figura I, está representado o bloco, ainda fora da água, em um instante t_1 e, na figura II, o mesmo bloco, em um instante t_2 posterior, quando já está dentro da água.

Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a tensão no cabo do guindaste em função do tempo.

10. (UFMG) Na figura, estão representadas duas esferas, I e II, de mesmo raio, feitas de materiais diferentes e imersas em um recipiente contendo água. As esferas são mantidas nas posições indicadas por meio de fios que estão tensionados.

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que o empuxo

A) é igual à tensão no fio para as duas esferas.
B) é maior na esfera de maior massa.
C) é maior que o peso na esfera I.
D) é maior que o peso na esfera II.

11. (UFMG) Um barco tem marcados em seu casco os níveis atingidos pela água quando navega com carga máxima no Oceano Atlântico, no Mar Morto e em água doce, conforme a figura. A densidade do Oceano Atlântico é menor que a do Mar Morto e maior que a da água doce.

A identificação **CERTA** dos níveis I, II e III, nessa ordem, é

A) Oceano Atlântico; água doce; Mar Morto.

B) água doce; Oceano Atlântico; Mar Morto.

C) água doce; Mar Morto; Oceano Atlântico.

D) Oceano Atlântico; Mar Morto; água doce.

E) Mar Morto; Oceano Atlântico; água doce.

12. (PUC Rio–2008) Uma caixa contendo um tesouro, com massa total de 100 kg e 0,02 m^3 de volume, foi encontrada no fundo do mar. Qual deve ser a força aplicada para se içar a caixa, enquanto dentro da água, mantendo durante toda a subida a velocidade constante?

Considere a aceleração da gravidade g = 10 m/s^2 e a densidade da água $\rho = 1{,}0 \times 10^3$ kg/m^3.

A) 725 N

B) 750 N

C) 775 N

D) 800 N

E) 825 N

13. (UFF-RJ–2008) Dejetos orgânicos depositados no fundo da Baía de Guanabara liberam bolhas de gases poluentes quando se decompõem. O diagrama a seguir representa uma bolha de gás que sobe no interior de um líquido em duas posições, I e II, ao longo da subida.

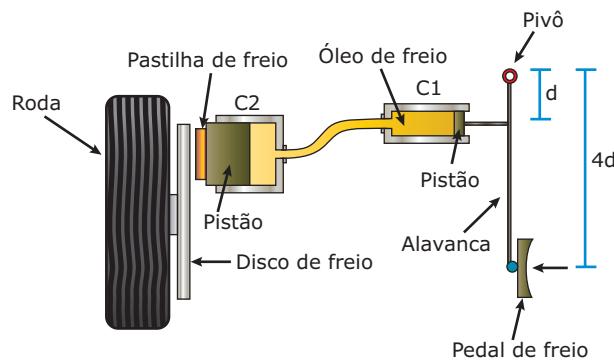
Identifique a alternativa que compara **CORRETAMENTE** as pressões (P) sobre a bolha, os módulos das resultantes das forças que o líquido faz sobre a bolha (E) e os módulos das acelerações (A) do movimento da bolha nas duas posições mostradas.

A) $P_I > P_{II}$, $E_I > E_{II}$, $A_I > A_{II}$

B) $P_I = P_{II}$, $E_I = E_{II}$, $A_I = A_{II}$

C) $P_I < P_{II}$, $E_I < E_{II}$, $A_I < A_{II}$

D) $P_I > P_{II}$, $E_I < E_{II}$, $A_I < A_{II}$

E) $P_I > P_{II}$, $E_I < E_{II}$, $A_I = A_{II}$

14. (UFMG–2007) Um automóvel move-se em uma estrada reta e plana, quando, em certo instante, o motorista pisa fundo no pedal de freio e as rodas param de girar. O automóvel, então, derrapa até parar. A velocidade inicial do automóvel é de 72 km/h e os coeficientes de atrito estático e cinético entre o pneu e o solo são, respectivamente, 1,0 e 0,8. Despreze a resistência do ar.

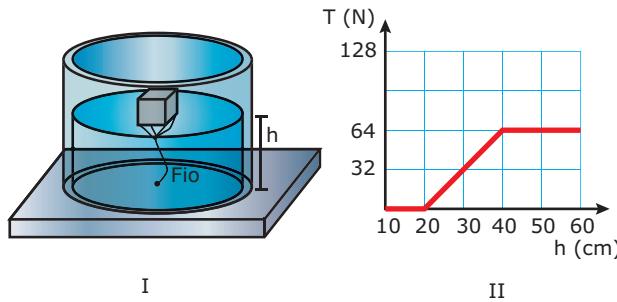
Considerando essas informações,

1. **CALCULE** a distância que o automóvel percorre, desde o instante em que o freio é acionado, até parar.

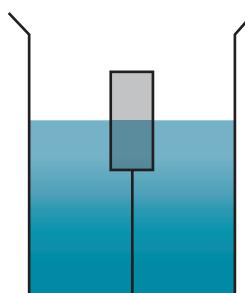
Quando se pisa no pedal de freio a fim de se fazer parar um automóvel, vários dispositivos entram em ação e fazem com que uma pastilha seja pressionada contra um disco metálico preso à roda. O atrito entre essa pastilha e o disco faz com que a roda, depois de certo tempo, pare de girar.

Na figura a seguir, está representado, esquematicamente, um sistema simplificado de freio de um automóvel.

Nesse sistema, o pedal de freio é fixado a uma alavanca, que, por sua vez, atua sobre o pistão de um cilindro, C1. Esse cilindro, cheio de óleo, está conectado a outro cilindro, C2, por meio de um tubo. A pastilha de freio mantém-se fixa ao pistão deste último cilindro.

Ao se pisar no pedal de freio, o pistão comprime o óleo existente em C1, o que faz com que o pistão de C2 se mova e pressione a pastilha contra o disco de freio.

Considere que o raio do cilindro C2 é três vezes maior que o do C1 e que a distância d do pedal de freio ao pivô da alavanca corresponde a quatro vezes a distância do pistão C1 ao mesmo pivô.

Com base nessas informações,

2. **DETERMINE** a razão entre a força exercida sobre o pedal de freio e a força com que a pastilha comprime o disco de freio.

15. (UFMG) Uma caixa cúbica de isopor, cuja massa é de 10 g, flutua dentro de um reservatório de óleo. Essa caixa está presa ao fundo do reservatório por um fio, como mostrado na figura I.

Considere que a massa do fio é desprezível e que, inicialmente, a altura da parte submersa da caixa é muito pequena. Em um certo instante, uma torneira que abastece o reservatório é aberta. Na figura II, está representado o gráfico do módulo da tensão T no fio em função da altura h do nível de óleo.

I II

1. Com base nessas informações, **EXPLIQUE** por que a tensão no fio
   A) é nula para o nível de óleo abaixo de 20 cm.
   B) aumenta linearmente para o nível de óleo entre 20 e 40 cm.
   C) é constante para o nível de óleo acima de 40 cm.
2. **DETERMINE** o comprimento aproximado da aresta do cubo. **JUSTIFIQUE** sua resposta.
3. **DETERMINE** a densidade do óleo utilizado.

16. (UFF-RJ) Uma rolha de cortiça, cilíndrica, de massa $3,14 \times 10^{-3}$ kg, tem raio igual a $1,0 \times 10^{-2}$ m e altura igual a $5,0 \times 10^{-2}$ m. Essa rolha se encontra presa por um fio, inextensível e de massa desprezível, ao fundo de um recipiente com água, em equilíbrio na vertical, com metade de seu volume imerso, conforme mostra o esquema da figura.

Dados: massa específica da água = $1,0 \times 10^3$ kg/m^3
aceleração da gravidade = 10 m/s^2

A) **REPRESENTE** todas as forças que atuam na rolha e **IDENTIFIQUE** seus respectivos agentes causadores.
B) **DETERMINE** a massa específica da cortiça.
C) **CALCULE** a força que a rolha exerce sobre o fio.

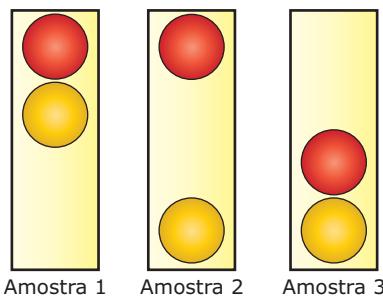
SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2010) Um brinquedo chamado ludião consiste em um pequeno frasco de vidro, parcialmente preenchido com água, que é emborcado (virado com a boca para baixo) dentro de uma garrafa PET cheia de água e tampada. Nessa situação, o frasco fica na parte superior da garrafa, conforme mostra a figura 1.

Figura 1

Quando a garrafa é pressionada, o frasco se desloca para baixo, como mostrado na figura 2.

Figura 2

Ao apertar a garrafa, o movimento de descida do frasco ocorre porque

A) diminui a força para baixo que a água aplica no frasco.
B) aumenta a pressão na parte pressionada da garrafa.
C) aumenta a quantidade de água que fica dentro do frasco.
D) diminui a força de resistência da água sobre o frasco.
E) diminui a pressão que a água aplica na base do frasco.

02. (Enem–2010) Durante uma obra em um clube, um grupo de trabalhadores teve de remover uma escultura de ferro maciço colocada no fundo de uma piscina vazia. Cinco trabalhadores amarraram cordas à escultura e tentaram puxá-la para cima, sem sucesso.

Se a piscina for preenchida com água, ficará mais fácil para os trabalhadores removerem a escultura, pois a

A) escultura flutuará. Dessa forma, os homens não precisarão fazer força para remover a escultura do fundo.

B) escultura ficará com peso menor. Dessa forma, a intensidade da força necessária para elevar a escultura será menor.

C) água exercerá uma força na escultura proporcional a sua massa, e para cima. Esta força se somará à força que os trabalhadores fazem para anular a ação da força peso da escultura.

D) água exercerá uma força na escultura para baixo, e esta passará a receber uma força ascendente do piso da piscina. Esta força ajudará a anular a ação da força peso na escultura.

E) água exercerá uma força na escultura proporcional ao seu volume, e para cima. Esta força se somará à força que os trabalhadores fazem, podendo resultar em uma força ascendente maior que o peso da escultura.

03. (Enem–2009) O controle de qualidade é uma exigência da sociedade moderna na qual os bens de consumo são produzidos em escala industrial. Nesse controle de qualidade, são determinados parâmetros que permitem checar a qualidade de cada produto. O álcool combustível é um produto de amplo consumo muito adulterado, pois recebe adição de outros materiais para aumentar a margem de lucro de quem o comercializa. De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o álcool combustível deve ter densidade entre 0,805 g/cm³ e 0,811 g/cm³. Em algumas bombas de combustível, a densidade do álcool pode ser verificada por meio de um densímetro similar ao desenhado a seguir, que consiste em duas bolas com valores de densidade diferentes e verifica quando o álcool está fora da faixa permitida. Na imagem, são apresentadas situações distintas para três amostras de álcool combustível.

Amostra 1

Amostra 2

Amostra 3

A respeito das amostras ou do densímetro, pode-se afirmar que

A) a densidade da bola escura deve ser igual a 0,811 g/cm³.

B) a amostra 1 possui densidade menor do que a permitida.

C) a bola clara tem densidade igual à densidade da bola escura.

D) a amostra que está dentro do padrão estabelecido é a de número 2.

E) o sistema poderia ser feito com uma única bola de densidade entre 0,805 g/cm³ e 0,811 g/cm³.

GABARITO

Fixação

01. A 02. C 03. D 04. C 05. B

Propostos

01. C 02. C 03. C 04. C 05. E 06. B 07. A 08. C 09. C 10. D 11. B 12. D 13. D

14. 1. d = 25 m
    2. $\frac{F_{pedal}}{F_{C2}} = \frac{1}{36}$

15. 1. A) A densidade da caixa é menor que a do óleo, logo, a caixa flutua, e o fio não está esticado.
    B) O fio fica esticado, e o empuxo cresce com o aumento da altura da parte submersa.
    $E = \rho_o A.(h - h_o)g;\ h_o = 20$ cm
    $\Rightarrow E = P + T \Rightarrow T = E - P$
    Como o peso é constante, T aumenta linearmente para o aumento do nível de óleo entre 20 e 40 cm.
    C) O fio está esticado e a caixa está totalmente submersa, logo, o empuxo não varia mais e, consequentemente, a tensão é constante.
    2. 20 cm, pois é o intervalo de comprimento em que o empuxo varia.
    3. $d_{óleo} = 8{,}0 \times 10^2$ kg/m³

16. A)

B) $\rho = 2{,}0 \times 10^2$ kg/m³

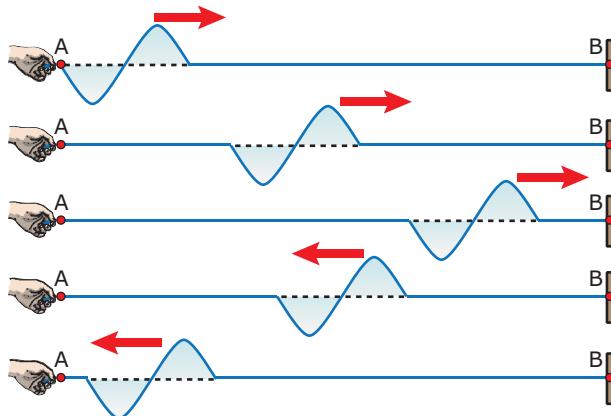
C) $F = 4{,}7 \times 10^{-2}$ N

Seção Enem

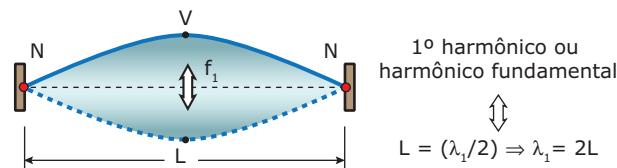
01. C 02. E 03. D

FÍSICA

MÓDULO 11 FRENTE C

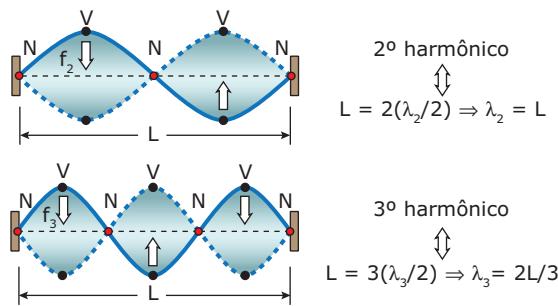
Ondas estacionárias

Quando um pulso ou uma onda se propaga através de uma corda, por exemplo, a energia é transmitida através dessa corda. Nesse caso, dizemos que a onda é **progressiva**, ou seja, a energia progride ao longo da corda. A figura a seguir mostra, em cinco instantes diferentes, uma onda que se desloca entre os pontos A e B de uma corda elástica. Observe que a onda e a energia transmitida por ela se deslocam de uma extremidade à outra da corda. Veja ainda que a primeira metade da onda, que possui uma crista, se desloca de A para B sempre na parte superior da figura. Ou seja, enquanto a onda se propaga de A para B, a parte da onda que caminha na frente será sempre uma crista.

Quando encontra a extremidade B, fixa, a onda é refletida com inversão de fase. Assim, a primeira metade da onda volta, após a reflexão, contendo um vale que vai se superpor à segunda metade da onda (que apresenta um vale), produzindo uma interferência construtiva. Após essa interferência, a segunda metade da onda sofre reflexão e volta contendo uma crista. A onda, assim, caminha para a esquerda, de forma ainda progressiva, com os mesmos valores de velocidade, frequência e comprimento de onda. Agora a parte da onda que caminha na frente é sempre um vale. Numa situação real, à medida que a onda propaga, a sua amplitude vai diminuindo com o passar do tempo. Ou seja, uma parte da energia da onda vai sendo transferida para o meio circundante.

O mesmo acontece com um pêndulo que, posto em oscilação, tem a sua amplitude de oscilação reduzida gradativamente até parar por completo. Isso ocorre porque o sistema transfere energia para o meio que o cerca. Se um agente externo fornece energia ao pêndulo, de maneira e frequência convenientes, ele pode manter a sua oscilação eternamente, como acontece com um relógio de pêndulo. Você, provavelmente, já deve ter se divertido em um balanço de cordas. Se uma pessoa empurra o balanço, fornecendo-lhe energia com a mesma frequência de oscilação do sistema e em fase com ele, a amplitude de oscilação do balanço pode ser alterada significativamente. Caso a energia fornecida ao balanço seja igual à energia transferida por ele ao meio circundante, a amplitude de oscilação do balanço permanece sempre a mesma. Entretanto, se a energia que o agente externo fornece ao balanço é maior que a energia que o sistema transfere ao meio, a amplitude de oscilação do balanço aumenta gradativamente. Nesses casos, dizemos que o sistema entra em **ressonância** com o agente externo.

Todo corpo material apresenta uma ou mais frequências naturais de vibração. Se um corpo recebe energia de um agente externo, numa das suas frequências naturais, ele começa a ressonar, e isso pode levar o sistema a oscilar eternamente ou a entrar em colapso. Muitos são os exemplos que ilustram essa situação. Um recipiente de vidro pode estourar se uma onda sonora, com frequência igual a uma das frequências naturais de vibração das moléculas do vidro, incidir sobre o recipiente. Um cálculo renal, por exemplo, pode ser desintegrado pela incidência de uma onda ultrassônica de frequência apropriada.

ONDAS ESTACIONÁRIAS EM CORDAS

Considere, agora, uma corda fixa nas extremidades e que um oscilador produza uma série de pulsos sucessivos, de determinada frequência. Os pulsos vão propagar através da corda, e cada um deles será refletido nas extremidades fixas desta. Nessas extremidades, a corda não pode oscilar e tais pontos ficarão, portanto, em repouso. Dependendo do valor da frequência imposta pelo oscilador, pode acontecer um padrão de interferência na corda, de modo que determinados pontos desta fiquem em permanente repouso, devido a uma constante interferência destrutiva, e outros pontos vibrem transversalmente, com amplitude máxima, em decorrência de uma permanente interferência construtiva. Quando tal padrão é obtido, a onda formada é chamada de **onda estacionária**. Nesse caso, não mais percebemos a onda propagar, ou seja, a energia deixa de progredir através da corda e fica aprisionada entre os pontos de constante interferência destrutiva – chamados **nós (N)** da onda estacionária. Os pontos da corda de maior amplitude de vibração transversal são chamados de **ventres (V)** da onda estacionária. Esse padrão de interferência ocorre para diversas frequências. As diversas situações nas quais se produz uma onda estacionária na corda são conhecidas como **harmônicos** ou **modos de vibração** da corda. Nessas situações, a corda entra em ressonância com o oscilador. Assim, os pontos da corda correspondentes aos ventres vibram com a maior amplitude possível (para aquela energia que o agente externo fornece).

A menor frequência, e, portanto, o maior comprimento de onda, que permite a formação de uma onda estacionária é chamada de 1º harmônico da onda ou de frequência fundamental. A figura a seguir mostra o 1º harmônico obtido numa corda elástica, de comprimento L, presa nas extremidades e posta a oscilar com frequência f_1. Quando um padrão semelhante ao mostrado na figura é obtido, percebemos a corda vibrar como um todo, nesse caso, para cima e para baixo, e não vemos a onda deslocar-se através da corda. Observe que a distância entre os dois nós é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$).

Usando a equação das ondas, a frequência fundamental (f_1) pode ser calculada por:

$$f_1 = v/\lambda_1 \Rightarrow \boxed{f_1 = v/2L}$$

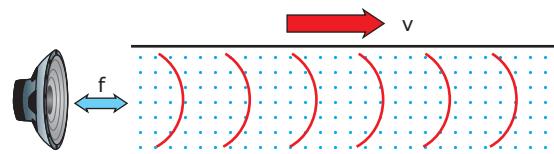
Sendo v o módulo da velocidade das ondas incidentes e refletidas nas extremidades da corda.

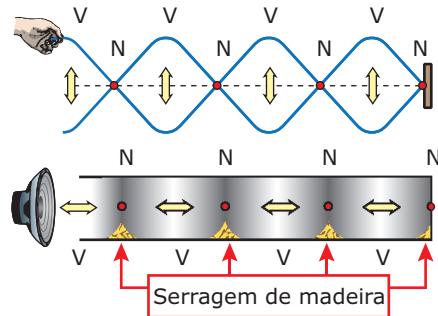
Se a frequência do oscilador aumenta, a frequência imposta à corda também aumenta. Como já dito, existem diversos padrões de ondas estacionárias – chamados harmônicos – nos quais a corda vibra com frequências múltiplas da frequência fundamental. Em todas essas situações, a distância entre dois nós consecutivos (ou duas cristas adjacentes) é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$). As figuras a seguir mostram o 2º e o 3º harmônicos. Observe que os pontos da corda onde estão os ventres oscilam, alternadamente, para baixo e para cima.

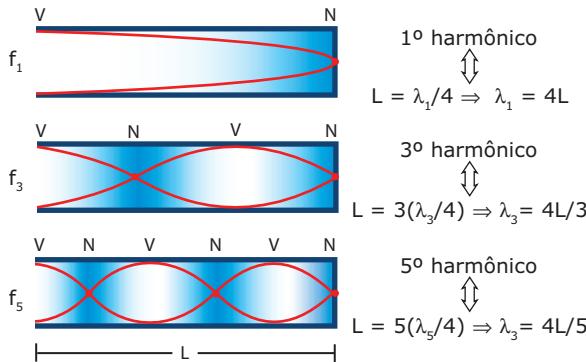
As frequências dos harmônicos mostrados são:

$f_2 = v/\lambda_2 \Rightarrow f_2 = v/L \Rightarrow f_2 = 2(v/2L) \Rightarrow f_2 = 2f_1$

$f_3 = v/\lambda_3 \Rightarrow f_3 = v/(2L/3) \Rightarrow f_3 = 3(v/\ 2L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$

Usando o mesmo raciocínio para outros harmônicos, é possível provar que a corda é capaz de vibrar, de forma estacionária, com diversas frequências, correspondentes a vários harmônicos distintos. Os valores das frequências desses harmônicos devem ser, sempre, múltiplos inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos pode ser determinada por:

$$\boxed{f_N = N.f_1}, \text{ em que } N = 1, 2, 3, \ldots$$

Na equação anterior, N representa o número do harmônico correspondente e, claro, a quantidade de ventres presentes na onda estacionária.

ONDAS ESTACIONÁRIAS EM TUBOS SONOROS

TUBO FECHADO

Considere um tubo, de comprimento L, fechado em uma extremidade e aberto na outra, preenchido com ar ou outro gás qualquer. Um tubo com tais características é chamado de **tubo fechado**. As partículas de ar em seu interior vibram de maneira aleatória, devido à agitação térmica, conforme visto no estudo de gases. Imagine que um alto-falante, por exemplo, seja colocado em vibração, com frequência f, na extremidade aberta do tubo, como mostra a figura a seguir.

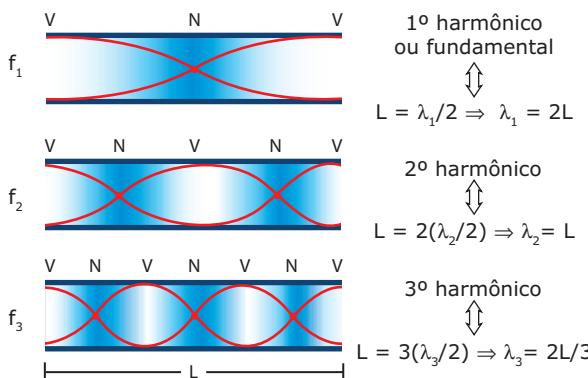
A vibração do alto-falante produz compressões e rarefações do ar no interior do tubo, de forma que uma onda longitudinal se propaga para a direita com velocidade v, comprimento de onda λ e frequência f. Essa onda é refletida pela extremidade fechada do tubo e volta com os mesmos valores de frequência e comprimento de onda e com velocidade de mesmo módulo. Assim, haverá uma superposição das ondas incidente e refletida. Dependendo da frequência das ondas produzidas pelo oscilador, um padrão de interferência poderá ser obtido e se produzirá, dentro do tubo, uma **onda estacionária**. Ou seja, o ar dentro do tubo entra em ressonância com o alto-falante. Os harmônicos dessa onda exigem que na extremidade fechada exista um **nó** (as moléculas em contato com a lateral direita do tubo não podem oscilar) e que na extremidade aberta exista um **ventre** (as moléculas vibram livremente para dentro e para fora do tubo com amplitude máxima). As ondas estacionárias em um tubo podem ser comparadas àquelas que se formam em uma corda vibrante. Para essa analogia, veja a figura a seguir. Observe que, nos ventres, as moléculas têm a máxima amplitude de vibração (região de rarefação) e, nos nós, elas não apresentam vibração perceptível (região de compressão). Se um pouco de serragem de madeira, por exemplo, for colocado em toda a extensão do tubo, antes de nele se estabelecer a onda estacionária, esse material ficará depositado nas regiões do tubo onde se formam os nós da onda, conforme mostrado a seguir.

Alguns dos harmônicos que podem ser estabelecidos em um tubo fechado estão mostrados a seguir. Uma vez que a distância entre dois nós (ou ventres) consecutivos é igual a meio comprimento de onda, a distância entre um nó e um ventre, adjacentes, é igual a um quarto do comprimento de onda ($D_{NV} = \lambda/4$).

As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo fechado podem ser calculadas pela equação das ondas:

$v = \lambda.f \Rightarrow = f = v/\lambda$, v = velocidade da onda no gás

1º harmônico: $f_1 = v/4L$;

3º harmônico: $f_3 = v/(4L/3) = 3(v/4L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$;

5º harmônico: $f_3 = v/(4L/5) = 5(v/4L) \Rightarrow f_5 = 5f_1$.

O fato de sempre existir um nó na extremidade fechada e um ventre na extremidade aberta limita o número de possíveis harmônicos da onda estacionária no tubo fechado a valores que sejam múltiplos ímpares inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos será:

$f_N = N.f_1$, em que N = 1, 3, 5, ...

TUBO ABERTO

Um tubo é chamado de **aberto** se possui as duas extremidades opostas abertas. Dessa forma, os harmônicos das ondas estacionárias que se estabelecem nesses tubos devem ter ventres nesses dois extremos. A figura a seguir mostra alguns harmônicos que se formam no tubo aberto. Quando tais harmônicos são obtidos, o ar no interior do tubo entra em ressonância com o agente externo que está produzindo a vibração.

As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo aberto são:

$v = \lambda.f \Rightarrow f = v/\lambda$, v = velocidade da onda no gás

1º harmônico: $f_1 = v/2L$;

2º harmônico: $f_2 = v/L = 2(v/2L) \Rightarrow f_2 = 2f_1$;

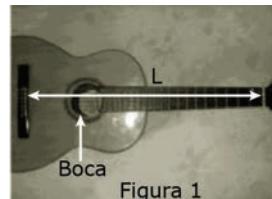
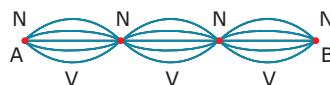
3º harmônico: $f_3 = v/(2L/3) = 3(v/2L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$.

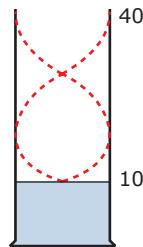
Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos será:

$f_N = N.f_1$, em que N = 1, 2, 3, ...

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFU-MG) Uma corda de um violão emite uma frequência fundamental de 440,0 Hz ao vibrar livremente, quando tocada na região da boca, como mostra a figura 1.

Pressiona-se então a corda, a L/3 de distância da pestana, como mostra a figura 2.

A frequência fundamental emitida pela corda pressionada, quando tocada na região da boca, será de

A) 660,0 Hz.
B) 146,6 Hz.
C) 880,0 Hz.
D) 293,3 Hz.

02. (UFSCar-SP) A figura representa uma configuração de ondas estacionárias numa corda.

A extremidade A está presa a um oscilador que vibra com pequena amplitude. A extremidade B é fixa e a tração na corda é constante. Na situação da figura, em que aparecem três ventres (V) e quatro nós (N), a frequência do oscilador é 360 Hz. Aumentando-se gradativamente a frequência do oscilador, observa-se que essa configuração se desfaz até aparecer, em seguida, uma nova configuração de ondas estacionárias, formada por

A) quatro nós e quatro ventres, quando a frequência atingir 400 Hz.
B) quatro nós e cinco ventres, quando a frequência atingir 440 Hz.
C) cinco nós e quatro ventres, quando a frequência atingir 480 Hz.
D) cinco nós e cinco ventres, quando a frequência atingir 540 Hz.
E) seis nós e oito ventres, quando a frequência atingir 720 Hz.

03. (PUC-Campinas-SP) Uma proveta graduada tem 40,0 cm de altura e está com água no nível de 10,0 cm de altura. Um diapasão de frequência 855 Hz vibrando próximo à extremidade aberta da proveta indica ressonância. Uma onda sonora estacionária possível é representada na figura a seguir. A velocidade do som, nessas condições, é, em m/s,

A) 326.
B) 334.
C) 342.
D) 350.
E) 358.

04. (PUC-SP) Temos dois tubos sonoros, A e B, cheios de ar. A é aberto e B, fechado, ambos com comprimento de 85 cm. Quais as frequências fundamentais, em Hz, em A e B, respectivamente, se a velocidade do som no ar é de 340 m/s?

A) 100 e 200
B) 100 e 400
C) 200 e 100
D) 300 e 400
E) 400 e 300

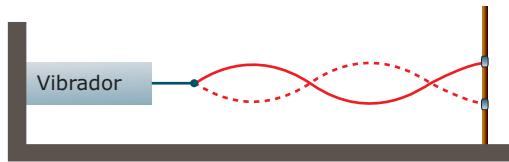
05. (UEPB–2010) *Todo corpo capaz de vibrar ou oscilar tem frequência natural de oscilação, quer seja ele uma lâmina de aço, um copo de vidro, um automóvel, quer seja uma ponte. Se uma fonte oscilante tiver a mesma frequência que a frequência natural de um corpo, este pode atingir o colapso. Foi o que aconteceu com a ponte de Tacoma em 1940 nos Estados Unidos, levando-a quebrar-se, conforme ilustrado a seguir.*

GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Ática, 2005.

Sobre este fenômeno, é **CORRETO** afirmar que

A) não há relação alguma entre as frequências da fonte oscilante e a frequência natural do corpo, que possa ocasionar o colapso.
B) é devido à superposição de ondas que a frequência da fonte oscilante pode atingir a frequência natural do corpo, e este entrar em colapso.
C) é devido à interferência das ondas que a frequência da fonte oscilante pode atingir a frequência natural do corpo, e este entrar em colapso.
D) quando a fonte oscilante tem frequência igual à frequência natural do corpo, este entra em ressonância.
E) o colapso acontece devido ao efeito Doppler.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (Cesesp-PE) Em uma corda de 7,5 cm de comprimento, fixa em ambas as extremidades, são produzidas ondas cujos comprimentos de onda, correspondentes ao modo fundamental e aos dois harmônicos seguintes, são, em cm,

A) 7,5; 5; 3,5.
B) 15; 7,5; 5.
C) 7,5; 3,5; 5.
D) 5; 7,5; 15.
E) 3,5; 5; 15.

02. (UFC–2010) Um motor produz pequenas vibrações transversais, com frequência de 10 Hz, em uma corda homogênea de 2,0 m de comprimento e densidade linear 0,05 kg/m. Uma das extremidades da corda é mantida fixa em uma parede, enquanto a outra está ligada ao motor. Sabendo-se que, com esta frequência, a corda está no segundo harmônico, determine o valor da tensão na corda e, em seguida, assinale a alternativa que apresenta **CORRETAMENTE** esse valor.

A) 10 N
B) 20 N
C) 200 N
D) 400 N
E) 1 000 N

03. (UFG–2010) Um violão possui seis cordas de mesmo comprimento L, porém, de massas diferentes. A velocidade de propagação de uma onda transversal em uma corda é dada por $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, onde T é a tensão na corda e μ, sua densidade linear de massa. A corda vibra no modo fundamental, no qual o comprimento L corresponde a meio comprimento de onda λ. A frequência de vibração de uma corda do violão aumentará se

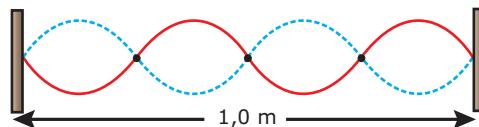
A) μ aumentar.

B) v diminuir.

C) L diminuir.

D) λ aumentar.

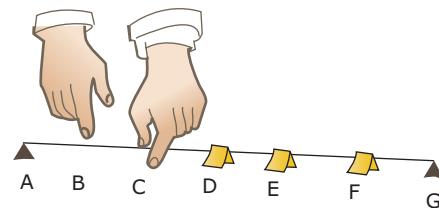
E) T diminuir.

04. (UFVJM-MG–2009) Observe esta figura.

Ela representa uma corda de 125 cm de comprimento, com uma ponta conectada a um anel sem peso que pode deslizar ao longo da haste sem atrito. A outra ponta está ligada à extremidade de um vibrador. Quando a frequência do vibrador é ajustada para 60 Hz, a corda vibra no padrão de onda estacionária. Com base nesses dados, assinale a alternativa que contém os valores **CORRETOS** para a velocidade de propagação e o comprimento de onda das ondas componentes, respectivamente.

A) 75 m/s e 1,25 m

B) 75 m/s e 1,00 m

C) 60 m/s e 1,00 m

D) 60 m/s e 1,25 m

05. (UFMG) Uma corda esticada produz um som de frequência fundamental 1 000 hertz. Para que a mesma corda produza um som de frequência fundamental 2 000 hertz, a tensão da corda deve ser

A) quadruplicada.

B) dobrada.

C) multiplicada por $\sqrt{2}$.

D) reduzida à metade.

E) reduzida a um quarto.

06. (PUCPR) Uma corda de 1,0 m de comprimento está fixa em suas extremidades e vibra na configuração estacionária conforme a figura a seguir. Conhecida a frequência de vibração igual a 1 000 Hz, podemos afirmar que a velocidade da onda na corda é

A) 500 m/s.

B) 1 000 m/s.

C) 250 m/s.

D) 100 m/s.

E) 200 m/s.

07. (PUC Rio) Uma corda de guitarra é esticada do ponto A ao ponto G da figura. São marcados os pontos A, B, C, D, E, F, G em intervalos iguais. Nos pontos D, E e F, são apoiados pedacinhos de papel. A corda é segurada com um dedo em C, puxada em B e solta. O que acontece?

A) Todos os papéis vibram.

B) Nenhum papel vibra.

C) O papel em E vibra.

D) Os papéis em D e F vibram.

E) Os papéis em E e F vibram.

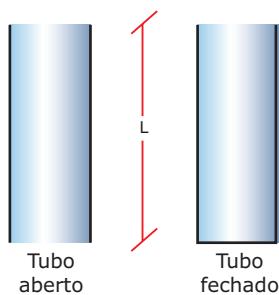
08. (UEPB–2009) Certo músico que tinha conhecimentos em física acústica decidiu construir um instrumento musical e, durante essa construção, medir a frequência fundamental do som emitido pela corda deste instrumento. Utilizando-se de uma corda que tem massa igual a 50 gramas, prendeu-a horizontalmente entre dois pontos distantes de 50 cm, e, aplicando uma força de tensão igual a 10 N à corda, esta vibrou e transmitiu vibrações aos pontos, formando ondas estacionárias. Pode-se dizer que a frequência fundamental do som emitido, em Hz, vale

A) 10.

B) $10^{1/2}$.

C) $10^{-1/2}$.

D) 1.

E) 10^2.

09. (PUC RS) Um tubo sonoro ressoa com mais intensidade na frequência de 680 hertz. Com experimentação apropriada, percebe-se a formação, no interior do tubo, de uma sucessão de nós e ventres. Sabendo-se que a velocidade de propagação do som é de 340 m/s, conclui-se que a distância entre dois nós consecutivos é de ____ cm.

A) 15

B) 20

C) 25

D) 30

E) 40

10. (PUC-SP) São dados dois tubos sonoros, de mesmo comprimento ℓ, sendo um deles (A) aberto e outro (B) fechado numa das extremidades. O comprimento de onda do som fundamental do primeiro tubo, A, é λ_A. Então, o comprimento de onda λ_B do som fundamental emitido pelo tubo B será

A) $(1/4)\lambda_A$.

B) $(1/2)\lambda_A$.

C) λ_A.

D) $2\lambda_A$.

E) $4\lambda_A$.

11. (FEPECS-DF–2008) Em linguagem musical, intervalo (i) entre duas notas de frequências f e f′ é a razão entre a maior e a menor frequência, ou seja, i = f′/f, sendo f < f′. O intervalo é denominado uníssono quando i = 1, tom maior quando i = 9/8, tom menor quando i = 10/9, semitom quando i = 16/15, e oitava quando i = 2. Considere dois tubos acústicos de mesmo comprimento L, sendo um aberto em ambas as extremidades e o outro fechado em uma das extremidades. O primeiro está vibrando numa frequência quatro vezes maior que sua fundamental, enquanto o segundo, numa frequência nove vezes maior que sua fundamental.

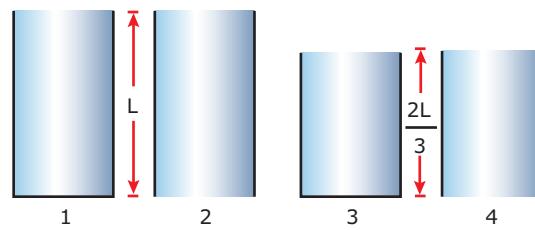
O intervalo entre os sons emitidos pelos dois tubos é

A) uníssono.

B) tom maior.

C) tom menor.

D) semitom.

E) oitava.

12. (PUC Minas) Um tubo sonoro está no ar (v_{som} = 320 m/s) e emite um som fundamental de frequência 80 Hz. Os dois harmônicos seguintes são emitidos com frequências respectivamente iguais a 240 Hz e 400 Hz. Leia atentamente as afirmativas a seguir.

I. O tubo é certamente fechado em uma das extremidades.

II. O tubo só emite harmônicos de ordem ímpar.

III. O tubo possui 1,0 m de comprimento.

Assinale

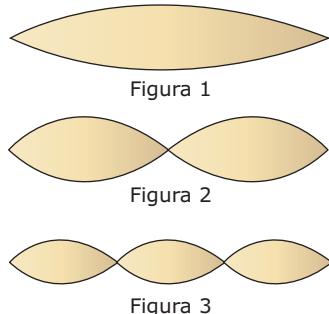
A) se todas as afirmativas estiverem corretas.

B) se todas as afirmativas estiverem incorretas.

C) se apenas as afirmativas I e II estiverem corretas.

D) se apenas as afirmativas I e III estiverem corretas.

E) se apenas as afirmativas II e III estiverem corretas.

13. (VUNESP) Dados os tubos acústicos da figura, assinale a ordem **CORRETA** das frequências fundamentais que eles emitem.

A) $f_4 > f_3 > f_2 > f_1$

B) $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$

C) $f_4 > f_2 > f_3 > f_1$

D) $f_1 > f_3 > f_2 > f_4$

E) $f_2 > f_3 > f_1 > f_4$

14. (UNIFESP) Se você colocar a sua mão em forma de concha junto a um de seus ouvidos, é provável que você ouça um leve ruído. É um ruído semelhante ao que se ouve quando se coloca junto ao ouvido qualquer objeto que tenha uma cavidade, como uma concha do mar ou um canudo. A fonte sonora que dá origem a esse ruído

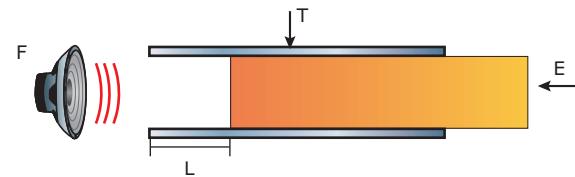
A) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som depende do material de que é feita a cavidade.

B) são as partículas do ar chocando-se com as paredes no interior da cavidade, e a frequência do som depende da abertura dessa cavidade.

C) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som depende da área da abertura dessa cavidade.

D) são as partículas do ar chocando-se com as paredes no interior da cavidade, e a frequência do som depende da forma geométrica da cavidade.

E) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som depende da forma geométrica da cavidade.

15. (PUC-Campinas-SP) Uma corda elástica está ligada a um vibrador e nela se estabelece uma propagação ondulatória. As figuras 1, 2 e 3 representam essa propagação ondulatória em três situações diferentes. Pode-se afirmar **CORRETAMENTE** que

A) a corda tem as duas extremidades fixas somente na situação da figura 1.

B) o comprimento de onda é o mesmo nas três situações.

C) o maior período ocorre na situação representada na figura 3.

D) nas três situações a corda está em ressonância com o vibrador.

E) a velocidade de propagação na situação da figura 3 é o triplo daquela da figura 1.

16. (UFRGS) Duas cordas de violão foram afinadas de modo a emitirem a mesma nota musical. Golpeando-se uma delas, observa-se que a outra também oscila, embora com menor intensidade. Esse fenômeno é conhecido por

A) batimentos.
B) interferência.
C) polarização.
D) ressonância.
E) amortecimento.

17. (Unimontes-MG–2009) O som de determinada frequência, emitido por uma trombeta, é capaz de quebrar uma taça de vidro (veja a figura). A taça, antes de quebrar, oscila na mesma frequência do som emitido pelo instrumento musical.

O fenômeno físico relacionado a esse evento é conhecido por

A) interferência.
B) ressonância.
C) difração.
D) refração.

18. (UFC) Considere o arranjo mostrado na figura a seguir, onde vemos um tubo sonoro T, ao qual está ajustado o êmbolo E, que pode ser movido convenientemente, e uma fonte F, que emite som de frequência constante f.

Utilizando esse arranjo, um estudante verificou que deslocando o êmbolo para a direita, desde a posição em que L é igual a zero, a primeira ressonância ocorreu na posição em que $L = L_1 = 18$ cm. Supondo que o estudante continue a deslocar o êmbolo para a direita, em qual valor subsequente L_2, em centímetros, ocorrerá uma nova ressonância?

19. (UFU-MG) Em uma experiência para medir a velocidade do som no ar, utilizou-se um tubo contendo água, aberto em uma extremidade, e um gerador de áudio com um alto-falante que gerava uma onda de 250 Hz. Observou-se que ocorria ressonância quando a coluna de ar era de 96 cm e que, abaixando o nível da água, a próxima ressonância ocorria quando a profundidade da coluna de ar era de 160 cm. Considerando os dados anteriores, **ENCONTRE** a velocidade do som nesta região.

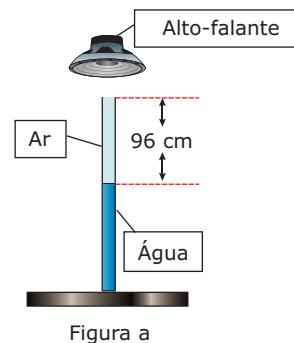



Figura a

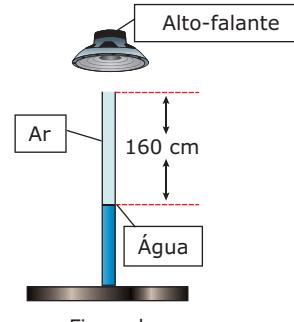
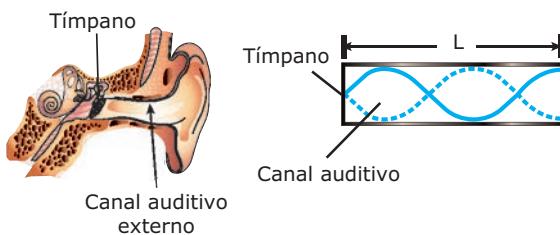



Figura b

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2009) Um dos modelos usados na caracterização dos sons ouvidos pelo ser humano baseia-se na hipótese de que ele funciona como um tubo ressonante. Neste caso, os sons externos produzem uma variação de pressão do ar no interior do canal auditivo, fazendo a membrana (tímpano) vibrar. Esse modelo pressupõe que o sistema funciona de forma equivalente à propagação de ondas sonoras em tubos com uma das extremidades fechadas pelo tímpano. As frequências que apresentam ressonância com o canal auditivo têm sua intensidade reforçada, enquanto outras podem ter sua intensidade atenuada.

Considere que, no caso de ressonância, ocorra um nó sobre o tímpano e ocorra um ventre da onda na saída do canal auditivo, de comprimento L igual a 3,4 cm. Assumindo que a velocidade do som no ar (v) é igual a 340 m/s, a frequência do primeiro harmônico (frequência fundamental, n = 1) que se formaria no canal, ou seja, a frequência mais baixa que seria reforçada por uma ressonância no canal auditivo, usando este modelo, é

A) 0,025 kHz, valor que considera a frequência do primeiro harmônico como igual a nv/4L e equipara o ouvido a um tubo com ambas as extremidades abertas.

B) 2,5 kHz, valor que considera a frequência do primeiro harmônico como igual a nv/4L e equipara o ouvido a um tubo com uma extremidade fechada.

C) 10 kHz, valor que considera a frequência do primeiro harmônico como igual a nv/L e equipara o ouvido a um tubo com ambas as extremidades fechadas.

D) 2 500 kHz, valor que expressa a frequência do primeiro harmônico como igual a nv/L, aplicável ao ouvido humano.

E) 10 000 kHz, valor que expressa a frequência do primeiro harmônico como igual a nv/L, aplicável ao ouvido e ao tubo aberto e fechado.

02. Uma ponte nos Estados Unidos desabou quando entrou em ressonância com o vento. A ponte sobre o Estreito de Tacoma, logo após ser liberada ao tráfego, começou a balançar sempre que o vento soprava um pouco mais forte. No dia 7 de novembro de 1940, aconteceu a ressonância. Inicialmente, a ponte começou a vibrar em modos longitudinais, mas logo apareceram os chamados "modos torsionais", nos quais a ponte balançava para os lados, se torcendo toda. Na ressonância, a amplitude desses modos torsionais aumentou de tal forma que a ponte desabou. Para que ocorra uma ressonância desse tipo é necessário que o vento forneça energia à ponte com frequência próxima a uma das frequências naturais de vibração da estrutura.

Ponte de Tacoma vibrando no modo torsional.

Um estádio de futebol deve ser construído levando em conta a "vibração" das torcidas. Se todo mundo começasse a pular e bater os pés, poderia surgir uma ressonância com as arquibancadas e aconteceria uma tragédia.

Disponível em: http://www.seara.ufc.br/tintim/fisica/ressonancia/ressonancia6.htm. Acesso em: 4 maio 2011 (Adaptação).

Uma grande estrutura de engenharia civil atual, como um estádio de futebol, por exemplo, é projetada de modo que as diversas partes que a compõe apresentem frequências de ressonância diferentes entre si. Dessa forma, o estádio não será destruído por ressonância porque

A) as diversas partes, ao entrarem em ressonância com a vibração da torcida, vibram em sentidos opostos. Dessa forma, as amplitudes de oscilação das partes vizinhas se anulam.

B) nenhuma das partes da estrutura entra em ressonância com a vibração da torcida. Dessa forma, toda a estrutura permanece em repouso e sem nenhuma vibração.

C) as partes que entram em ressonância aumentam a amplitude de vibração. Entretanto, elas transmitem a vibração às partes vizinhas, que entram em ressonância com aquelas, dividindo assim energia absorvida.

D) apenas as partes que entram em ressonância têm a amplitude de vibração aumentada. Isso faz com elas induzam uma onda eletromagnética que percorre toda a obra, estabilizando a estrutura.

E) apenas as partes que apresentam frequência de vibração semelhante àquela imposta pela torcida entram em ressonância. Assim, o aumento de amplitude é pequeno e restrito, praticamente, a elas.

GABARITO

Fixação

01. A 02. C 03. C 04. C 05. D

Propostos

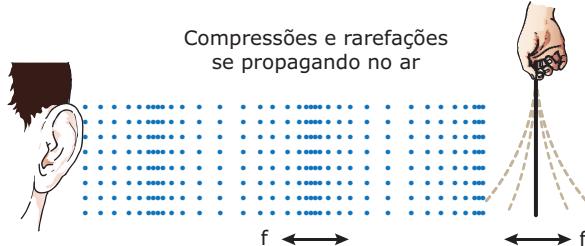
01. B	05. A	09. C	13. C	17. B
02. B	06. A	10. D	14. E	18. 54 cm
03. C	07. D	11. B	15. D	19. 320 m/s
04. C	08. A	12. A	16. D	

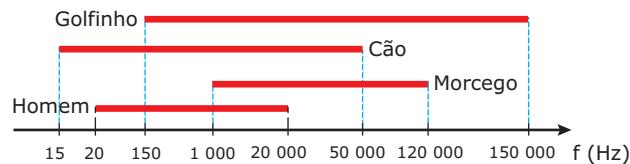
Seção Enem

01. B 02. E

FÍSICA

MÓDULO 12 FRENTE C

Som e efeito Doppler

ONDAS SONORAS

Quando, por exemplo, uma lâmina é posta em vibração, ela provoca um distúrbio vibratório que se propaga através das moléculas de ar de forma semelhante à onda que se propaga em uma mola que vibra longitudinalmente. Quando essa vibração atinge o tímpano, ela é transmitida pelo sistema auditivo até o cérebro. Se a frequência de vibração da lâmina estiver dentro da faixa de audição humana, a pessoa que recebeu essa vibração escutará o som produzido pela lâmina. Ou seja, sempre que uma onda sonora é produzida, um corpo está em vibração de modo a gerar aquele som. Veja a seguir.

As cordas vibrantes e os tubos sonoros são muito usados em instrumentos musicais de corda e de sopro, respectivamente, para produção de ondas sonoras. Quando as cordas e os tubos entram em ressonância com o agente externo, os elementos vibrantes oscilam com a máxima amplitude para aquele valor de energia fornecido pelo executor do instrumento, e o som produzido é bem perceptível.

A onda sonora é uma onda mecânica, longitudinal, que necessita de um meio material para se propagar. As partículas que compõem o meio oscilam durante a passagem dessa onda. Assim, o meio de propagação apresenta, em certo instante, regiões nas quais a densidade de partículas é maior e outras regiões em que a densidade de partículas é menor. Ou seja, o meio apresenta regiões de maior e de menor pressão, respectivamente. A distância entre duas regiões adjacentes de maior pressão (ou de menor pressão) corresponde ao comprimento de onda (λ) da onda sonora. Dessa forma, medindo-se a pressão nos diversos pontos do meio, conseguimos determinar o seu comprimento de onda.

O espectro das ondas sonoras, para um determinado observador, é composto de três tipos de ondas: o infrassom, o som e o ultrassom. O som, para o homem, corresponde às ondas sonoras com frequências compreendidas entre 20 Hz e 20 000 Hz. Ou seja, o ouvido humano é sensível apenas às ondas sonoras cujas frequências estejam compreendidas nesse intervalo. Esses números são considerados valores padrão e variam de uma pessoa para outra e, muito, com a idade do ouvinte. Um fato alarmante que os médicos têm detectado na conturbada vida atual é o estreitamento dessa faixa de sons audíveis, principalmente nas altas frequências. Isso se deve, segundo eles, à enorme poluição sonora a que a população urbana está submetida. Certos animais escutam sons abaixo e acima dos valores citados. Muitos deles, inclusive, usam esses sons para mapear o espaço à sua volta. A figura a seguir mostra a faixa audível (som) para alguns animais. O eixo das frequências não está em escala.

Para qualquer um dos animais citados, as ondas sonoras com frequências abaixo e acima da sua faixa audível (som) correspondem ao infrassom e ao ultrassom, respectivamente.

Durante a passagem da onda sonora, as partículas do meio transmitem a energia para as suas vizinhas imediatas, que o fazem para as outras partículas adjacentes, e assim por diante. Dessa forma, quanto mais rapidamente as partículas transferem a energia umas às outras, mais rapidamente a onda sonora propaga através do meio. Assim, fica claro que a onda sonora não pode se propagar no vácuo. A velocidade da onda sonora, em determinado meio, depende de vários fatores, entre eles a elasticidade, a densidade, a rigidez, o grau de organização das partículas e a temperatura do meio. A tabela a seguir mostra a velocidade, aproximada, da onda sonora em algumas substâncias.

Velocidade da onda sonora (m/s)				
Borracha	Ar (20 °C)	Ar (40 °C)	Água	Aço
60	340	352	1 450	5 100

Um fato muito importante deve ser destacado no que diz respeito à velocidade da onda sonora: todas as ondas sonoras, independentemente do tipo (som, infrassom ou ultrassom) e da sua frequência, se propagam num certo meio com a mesma velocidade.

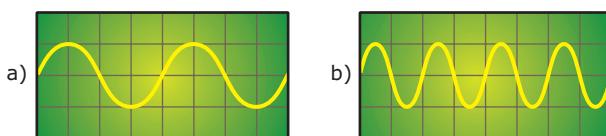
Observe a tabela anterior. Veja que a velocidade do som no ar aumenta com a temperatura. É fácil perceber o motivo. Quanto maior a temperatura, maior a agitação térmica das moléculas, e, dessa forma, elas transmitem a energia umas às outras mais rapidamente.

PARA REFLETIR

Por que a velocidade do som, para os meios citados, é menor na borracha?

QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM

O osciloscópio é um aparelho capaz de captar um sinal de áudio (onda sonora), que é longitudinal, e apresentar, em sua tela, uma "onda transversal" que corresponde ao sinal de entrada. A figura a seguir mostra, respectivamente, a onda sonora (som) progressiva – que se desloca ao longo do meio de propagação – e a tela do aparelho.

Veja que as compressões e rarefações da onda sonora são representadas no osciloscópio por cristas e por vales, respectivamente. Dessa forma, fazendo a leitura do aparelho, podemos determinar as grandezas características da onda sonora (período, frequência, velocidade, comprimento de onda e amplitude). Ou seja, o osciloscópio nos permite "visualizar" a onda sonora. Nas figuras a seguir, representaremos, exceto quando especificado o contrário, a onda sonora conforme vista na tela do osciloscópio.

O ouvido humano é capaz de perceber três características no som, conhecidas como qualidades fisiológicas do som, as quais nos permitem distinguir sons uns dos outros. Essas qualidades são: altura, intensidade e timbre.

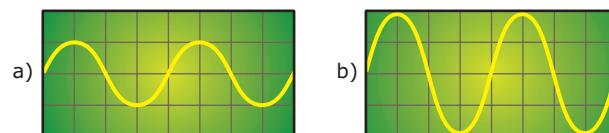
ALTURA

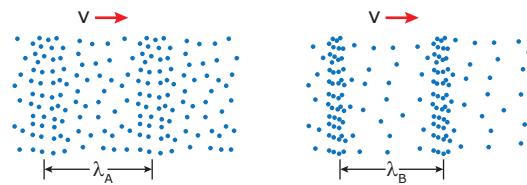
A **altura do som** é a qualidade fisiológica pela qual podemos diferenciar os sons **graves** dos sons **agudos**. A altura é uma característica relacionada com a **frequência** (f) do som. Na música, a altura do som é usada para classificar as notas musicais. Assim, elas (dó, ré, mi, fá, sol, lá, si) são sons musicais de frequências e, claro, de alturas diferentes. Veja, a seguir, a relação entre essas grandezas.

$$\text{Som mais}\begin{cases}\text{ALTO} \Rightarrow \text{f maior} \Rightarrow \text{mais AGUDO}\\ \text{BAIXO} \Rightarrow \text{f menor} \Rightarrow \text{mais GRAVE}\end{cases}$$

As figuras a seguir mostram duas ondas sonoras (a) e (b). O eixo horizontal do osciloscópio está calibrado para o mesmo intervalo de tempo. Observe que a onda (b) tem o dobro da frequência de (a). Dessa forma, o som (b) é mais alto e mais agudo que o som (a).

a)

b)

INTENSIDADE

A **intensidade do som** é a qualidade fisiológica que nos permite diferenciar os sons **fortes** dos sons **fracos**. O nível ou volume sonoro estão associados a essa qualidade.

A intensidade depende da **amplitude** (A) da onda sonora e, dessa forma, da energia (E) transportada pela onda e necessária para produzi-la. Se você fala com um volume de voz mais elevado, por exemplo, as moléculas de ar vão vibrar com maior amplitude, a onda sonora terá maior intensidade, e você gastará mais energia.

$$\text{Som}\begin{cases}\text{MAIS intenso} \Rightarrow \text{A maior} \Rightarrow \text{E maior} \Rightarrow \text{mais FORTE}\\ \text{MENOS intenso} \Rightarrow \text{A menor} \Rightarrow \text{E menor} \Rightarrow \text{mais FRACO}\end{cases}$$

As figuras (a) e (b) a seguir mostram, na tela do osciloscópio, dois sons de mesma altura (mesma frequência), que se deslocam até o aparelho. Veja que o som (b) tem maior amplitude (A) e, dessa forma, é mais intenso e mais forte.

a)

b)

A figura a seguir mostra, de forma aproximada, a densidade das moléculas de ar correspondente aos sons (a) e (b), que se deslocam através do meio com a mesma velocidade (v). Observe que os comprimentos de onda são iguais para as duas ondas.

O som de um trovão é intenso (forte) e baixo (grave). O som emitido por um pernilongo é exatamente o oposto do som emitido pelo trovão: ele é um som pouco intenso (fraco) e alto (agudo). Uma sirene típica emite som forte e alto. A batida do coração, que mal ouvimos, é um som fraco e baixo.

Os pesquisadores mediram a intensidade sonora mínima (I_0) que uma pessoa pode escutar. Os valores obtidos, para uma pessoa de audição normal, variam de 10^{-16} W/m² a 10^{-12} W/m². Neste estudo, vamos considerar que esse valor seja $I_0 = 10^{-12}$ W/m². Não é necessário você guardar esse número, pois, se for indispensável na solução de algum exercício, ele será fornecido.

O nível de intensidade sonora (N) determina a relação entre a intensidade (I) de um som e a intensidade mínima (I_0):

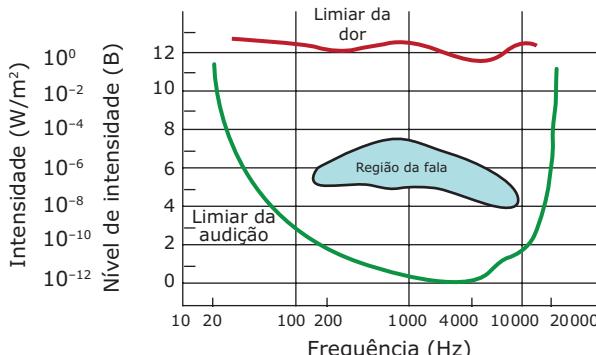
$$N = \log \frac{I}{I_0}$$

O nível de intensidade sonora (N) é medido, na equação anterior, em uma unidade chamada bel (B). Sons comuns, como aqueles que ocorrem em uma conversa moderada, giram em torno de 4 B. Sons mais fortes, como o som de veículos em um trânsito intenso, são próximos de 8 B. O limiar da dor, ou seja, a intensidade sonora máxima que nosso ouvido pode tolerar, corresponde a sons cujo nível de intensidade sonora é maior que 12 B.

Lembre-se de que: $\log_{10} y = x \Rightarrow 10^x = y$

Vamos comparar a intensidade sonora para os seguintes valores de níveis de intensidade:

$N_1 = 4\ B \Rightarrow 4 = \log (I_1/10^{-12}) \Rightarrow I_1 = 10^{-8}\ W/m^2$

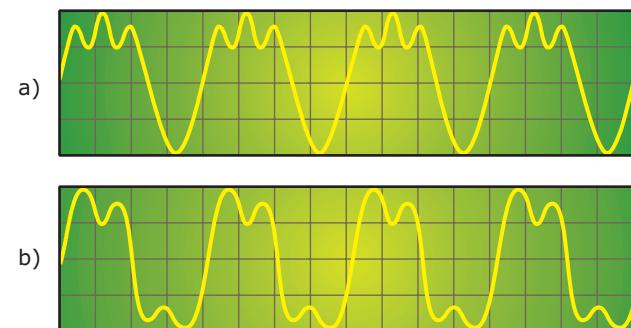
$N_2 = 5\ B \Rightarrow 5 = \log (I_2/10^{-12}) \Rightarrow I_2 = 10^{-7}\ W/m^2$

$N_3 = 6\ B \Rightarrow 6 = \log (I_3/10^{-12}) \Rightarrow I_3 = 10^{-6}\ W/m^2$

Assim, $I_3 = 10.I_2 = 100.I_1$.

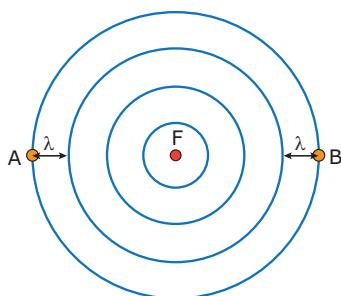
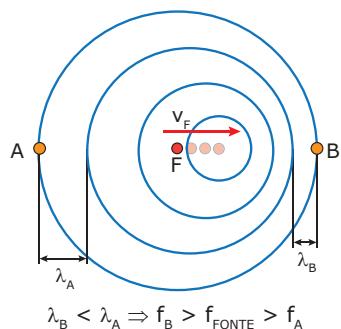
Observe que cada unidade que se aumenta no nível de intensidade, em B, corresponde a multiplicar a intensidade sonora por 10. Dessa forma, um som de 8 B é 1 000 vezes mais intenso que um outro de 5 B.

É usual que o nível de intensidade sonora seja fornecido em dB (decibel), que corresponde à décima parte do bel. Assim, 1 B = 10 dB. Se o nível de intensidade sonora estiver em dB, você deve dividir por 10 para obter o valor em bel e, assim, poderá usar a equação anterior.

A figura a seguir mostra a intensidade e o nível de intensidade sonora para diversas faixas de frequência.

Observe na figura que, próximo dos 4 000 Hz, somos capazes de ouvir sons com as menores intensidades. Veja, ainda, que a região da fala é bem mais "estreita" (entre 200 Hz e 10 000 Hz, aproximadamente) do que a região de audição. Vale ressaltar que as ondas sonoras com frequências próximas a 20 Hz ou 20 000 Hz (limites de audição) exigem uma intensidade sonora muito elevada, próxima do limiar da dor, para serem ouvidas. Deve ficar claro que os valores mostrados variam de uma pessoa para outra.

TIMBRE

O **timbre do som** é a qualidade fisiológica que nos permite distinguir sons provenientes de diferentes fontes sonoras. Ele está relacionado com a **forma** da onda sonora resultante. Quando vibramos a corda de um instrumento musical, por exemplo, ela provoca a vibração dos diversos elementos materiais que compõem o instrumento. Dessa forma, várias ondas são geradas simultaneamente. A combinação de todas essas vibrações e dos diversos harmônicos da corda produz uma onda típica e característica do instrumento. A frequência dessa onda será, sempre, a frequência fundamental da corda que está em vibração. Se dois instrumentos musicais diferentes emitirem sons de mesma altura e de mesma intensidade, poderemos distinguir um som do outro. Isso é possível porque cada instrumento possui um timbre peculiar e característico. Quando reconhecemos a voz de uma pessoa, mesmo que não a vejamos, é devido ao fato de que cada indivíduo possui um timbre de voz.

O timbre que caracteriza um determinado violão, por exemplo, depende de vários fatores. Entre eles, podemos citar os diversos harmônicos da corda que está em vibração, a intensidade relativa de cada um desses harmônicos, o formato da caixa de ressonância (que é um tubo fechado) e o material de que ela é feita. Você já deve ter notado que dois violões, aparentemente idênticos, podem emitir sons distintos.

A figura a seguir representa sons emitidos por uma flauta (a) e por um piano (b), analisados através do osciloscópio. Observe que os sons correspondem à mesma nota musical, pois apresentam a mesma frequência (mesmo período). Os sons apresentam, também, a mesma intensidade, pois eles possuem a mesma amplitude. Entretanto, a forma da onda é diferente para os dois sons. Dessa forma, o nosso ouvido consegue distinguir um som do outro.

EFEITO DOPPLER

Imagine duas situações bem conhecidas de todos. Primeira situação: você está parado no passeio e uma ambulância passa com a sirene ligada. Quando ela se aproxima de você e depois se afasta, você percebe que o som da sirene, inicialmente, parece mais alto (agudo) e, posteriormente, mais baixo (grave). Segunda situação: considere que você está com uma lancha em uma lagoa. O vento faz com que ondas ("marolas") atinjam a embarcação, com determinada frequência. Se a lancha se movimenta de encontro a essas ondas, ela será atingida por uma quantidade maior de cristas e o navegante achará que a frequência das ondas aumentou. Entretanto, se a lancha se movimenta no mesmo sentido das ondas, ela será atingida por uma quantidade menor de cristas e o navegante achará que a frequência das ondas diminuiu. Nos dois exemplos, a **frequência percebida** pelo observador está alterada em relação às frequências verdadeiras das fontes emissoras. Essa alteração da frequência percebida, devido ao movimento relativo entre a fonte de ondas e o observador, é conhecida como efeito Doppler e pode acontecer com qualquer tipo de onda.

Considere uma fonte pontual emitindo ondas circulares centradas na posição F. Os observadores A e B, colocados nas posições indicadas, recebem tais ondas com um mesmo comprimento de onda λ, conforme a figura a seguir. Nela, cada linha representa uma crista da onda. Uma vez que a velocidade da onda é a mesma, as frequências percebidas pelos observadores são idênticas e iguais à frequência da fonte que gerou as ondas.

Agora, imagine que a fonte se movimenta para a direita com determinada velocidade (v_F). A velocidade da onda não é alterada pelo movimento da fonte, pois aquela depende apenas do meio de propagação. Dessa forma, cada crista, embora circular (velocidade constante), está centrada na posição em que a fonte se encontrava no momento que aquela crista foi gerada. Logo, os observadores A e B recebem as ondas como se o comprimento de onda estivesse alterado. Assim, eles percebem frequências distintas e diferentes da frequência da fonte. Veja a seguir.

$$\lambda_B < \lambda_A \Rightarrow f_B > f_{FONTE} > f_A$$

A frequência percebida fica também alterada se os observadores se deslocam em relação à fonte. Considere a fonte em repouso. Se o observador se aproxima dela, ele recebe uma quantidade maior de cristas por unidade de tempo, pois ele vai de encontro a elas. Dessa forma, o observador percebe uma frequência maior que a frequência emitida pela fonte. Se o observador se afasta da fonte, ele recebe uma quantidade menor de cristas num certo intervalo de tempo, pois ele tenta escapar das cristas. Assim, a frequência percebida é menor do que a frequência emitida pela fonte. O fenômeno fica ainda mais evidente quando existe um movimento no qual tanto a fonte quanto o observador se afastam ou se aproximam um do outro.

Para o caso das ondas sonoras, a frequência aparente – aquela percebida pelo observador – pode ser calculada, em relação à frequência da fonte, pela equação:

$$f_{APARENTE} = f_{FONTE}.\left(\frac{v_{SOM} + v_{OBSERVADOR}}{v_{SOM} - v_{FONTE}}\right)$$

Nessa equação, os sinais se referem a uma dupla **aproximação** entre fonte e observador. Se algum deles se movimentar no sentido de afastar-se, o sinal da respectiva velocidade deve ser alterado. Por exemplo, se o observador tenta afastar-se da fonte, $v_{OBSERVADOR}$ deve ter sinal negativo. Se a fonte tenta afastar-se do observador, v_{FONTE} deve ter sinal positivo. É claro que, se o observador ou a fonte estiverem em repouso, a sua velocidade é nula, e a equação se torna mais simples. Vale ressaltar que essa equação só é válida para velocidades da fonte e do observador menores que a velocidade da onda.

O efeito Doppler tem muitas aplicações no nosso dia a dia. O radar, que monitora a velocidade de veículos nas estradas, é uma dessas aplicações. Considere um veículo que se aproxima do radar. O aparelho emite uma onda de frequência f_0, que é refletida pelo veículo e volta para o dispositivo. Devido ao movimento de aproximação, o carro funciona como uma fonte em movimento, "emissora" de ondas refletidas que o radar recebe de volta com uma frequência f, maior que f_0. Conhecendo-se os valores dessas frequências e da velocidade da onda, o dispositivo determina e indica a velocidade do veículo.

As ondas eletromagnéticas, como a luz, também apresentam efeito Doppler. A frequência da luz está associada à cor da radiação emitida. Considere uma fonte irradiando, por exemplo, luz monocromática amarela. Se essa fonte se aproxima de um observador, com grande velocidade, a luz recebida por ele tende para o azul (frequência maior). Se a fonte, por outro lado, se afasta do observador, a luz que ele recebe tende para o vermelho (frequência menor). Por meio de potentes telescópios que vasculham o Universo, alguns cientistas perceberam que as luzes emitidas pelas estrelas que estão à nossa volta estão desviadas para o vermelho. Dessa forma, eles concluíram que todas as estrelas se afastam de nós e umas das outras. A única explicação, até agora, para esse afastamento é considerar o Universo em expansão. Os cientistas mediram a velocidade com que as estrelas se afastam, usando o efeito Doppler, e concluíram, também, que quanto maior o afastamento de uma estrela, maior a sua velocidade de afastamento.

Para que exista alteração na frequência da luz, como consequência do efeito Doppler, a velocidade da fonte ou do observador deve ser comparável à velocidade da luz. Dessa forma, a equação apresentada anteriormente não é aplicável para ondas eletromagnéticas, pois, nesse caso, os efeitos relativísticos devem ser considerados.

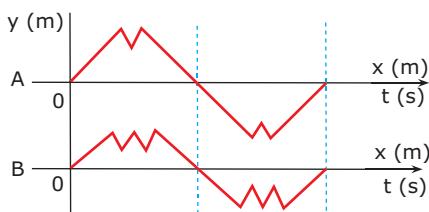
EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma fonte sonora, em repouso, emite ondas com frequência f_0, que se propagam no ar com velocidade v = 330 m/s. Um carro de corrida, com um detector instalado em seu interior, se aproxima e depois afasta-se dessa fonte. O detector acusa que a frequência de aproximação é o dobro da frequência durante o afastamento do veículo. Determinar a velocidade do carro.

Resolução:

Sejam f_1 e f_2 as frequências aparentes de aproximação e de afastamento do carro de corrida, respectivamente. Como a fonte está em repouso, $v_{FONTE} = 0$. Assim, a equação do efeito Doppler, nos dois casos, será:

$$f_1 = f_0\left(\frac{v_{SOM} + v_{CARRO}}{v_{SOM}}\right); \quad f_2 = f_0\left(\frac{v_{SOM} - v_{CARRO}}{v_{SOM}}\right)$$

Como $f_1 = 2f_2$, temos que:

$$f_0\left(\frac{v_{SOM} + v_{CARRO}}{v_{SOM}}\right) = 2.f_0\left(\frac{v_{SOM} - v_{CARRO}}{v_{SOM}}\right)$$

$$\Rightarrow v_{SOM} + v_{CARRO} = 2(v_{SOM} - v_{CARRO}) \Rightarrow v_{CARRO} = v_{SOM}/3$$

$$\Rightarrow v_{CARRO} = 110 \text{ m/s} = 396 \text{ km/h}.$$

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (Fatec-SP) Ondas sonoras são compressões e rarefações do meio material através do qual se propagam. Podemos dizer que

A) o som pode propagar-se através do vácuo.

B) o som não pode propagar-se através de um sólido.

C) o som somente se propaga através do ar.

D) as ondas sonoras transmitem-se mais rapidamente através de líquidos e de sólidos do que através do ar.

E) para as ondas sonoras, não se verificam os fenômenos de interferência nem de difração.

02. (UFMG) Ao tocar um violão, um músico produz ondas nas cordas desse instrumento. Em consequência, são produzidas ondas sonoras que se propagam no ar. Comparando-se uma onda produzida em uma das cordas do violão com a onda sonora correspondente, é **CORRETO** afirmar que as duas têm

A) a mesma amplitude.

B) a mesma frequência.

C) a mesma velocidade de propagação.

D) o mesmo comprimento de onda.

03. (PUC Minas) As vozes de dois cantores, emitidas nas mesmas condições ambientais, foram representadas em um osciloscópio e apresentaram os aspectos geométricos indicados a seguir:

A respeito dessas ondas, foram feitas várias afirmativas:

1. As vozes possuem timbres diferentes.
2. As ondas possuem o mesmo comprimento de onda.
3. Os sons emitidos possuem alturas iguais.
4. As ondas emitidas possuem a mesma frequência.
5. Os sons emitidos possuem a mesma intensidade.
6. As ondas emitidas possuem amplitudes diferentes.
7. O som indicado em A é mais agudo do que o indicado em B.
8. Os períodos das ondas emitidas são iguais.

O número de afirmativas **CORRETAS** é igual a

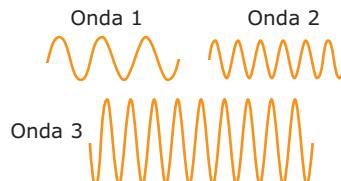
A) 3.

B) 4.

C) 5.

D) 6.

E) 7.

04. (FMABC-SP) Um violonista obtém diferentes notas musicais tocando uma mesma corda, prendendo-a em pontos diferentes do braço do violão. Desse modo, ele varia o comprimento da parte que vibra da corda conseguindo, assim, emitir sons de diversas frequências. Isto ocorre porque

A) a frequência do som é tanto menor quanto maior for o comprimento da parte que vibra (da corda).

B) a frequência do som é tanto maior quanto menor for a força tensora da parte que vibra.

C) a frequência do som será tanto maior quanto maior for a massa da corda.

D) a frequência do som não depende da massa da corda vibrante.

E) a frequência do som não depende da força tensora na corda vibrante.

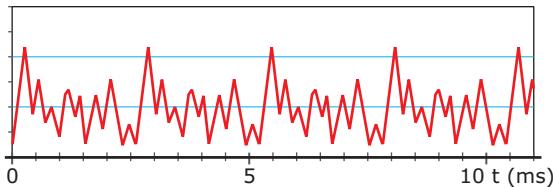
05. (UFU-MG) Um morcego, voando com velocidade v_0 em direção a uma superfície plana, emite uma onda ultrassônica de frequência f_0. Sabendo-se que a velocidade do som é v, a variação de frequência ouvida pelo morcego será

A) $\Delta f = f_0\left(\dfrac{v}{v_0}\right)$.

B) $\Delta f = f_0\left(\dfrac{v_0}{v}\right)$.

C) $\Delta f = f_0\left(\dfrac{2v_0}{v - v_0}\right)$.

D) $\Delta f = f_0\left(\dfrac{v + v_0}{v - v_0}\right)$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (FCMMG / Adaptado) As figuras seguintes representam três ondas sonoras que se propagam em um mesmo meio, captadas por um microfone em momentos diferentes e transformadas em ondas transversais na tela de um computador.

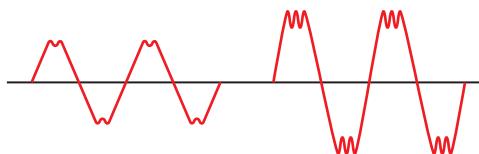
Quanto às suas características, pode-se afirmar que

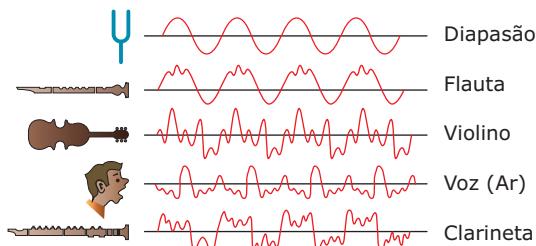
A) as três ondas têm timbres diferentes.

B) as ondas 1 e 2 têm o mesmo período.

C) as ondas 2 e 3 têm a mesma frequência.

D) a onda 3 tem maior comprimento de onda do que a 1.

02. (FUVEST-SP–2010) Um estudo de sons emitidos por instrumentos musicais foi realizado usando um microfone ligado a um computador. O gráfico a seguir, reproduzido da tela do monitor, registra o movimento do ar captado pelo microfone, em função do tempo, medido em milissegundo, quando se toca uma nota musical em um violino.

Nota	dó	ré	mi	fá	sol	lá	si
Frequência (Hz)	262	294	330	349	388	440	494

Consultando a tabela anterior, pode-se concluir que o som produzido pelo violino era o da nota

A) dó.
B) mi.
C) sol.
D) lá.
E) si.

03. (FCMMG) A figura mostra a forma da onda sonora de dois instrumentos. As ondas dos dois instrumentos têm em comum

A) a mesma intensidade.
B) a mesma amplitude.
C) a mesma frequência.
D) o mesmo timbre.

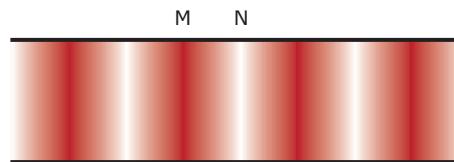
04. (UFU-MG) A figura a seguir mostra as diversas formas das ondas sonoras produzidas pelos instrumentos musicais, emitindo a mesma nota e com a mesma intensidade.

Analise as afirmações a seguir:

I. As ondas da figura anterior apresentam a mesma altura.

II. As ondas da figura anterior apresentam o mesmo timbre.

III. A onda produzida pelo violino se propaga no ar com o mesmo comprimento de onda que tinha na corda.

IV. As ondas sonoras são transversais.

Assinale

A) se apenas I e II estiverem corretas.
B) se apenas I estiver correta.
C) se apenas I e III estiverem corretas.
D) se apenas IV estiver correta.

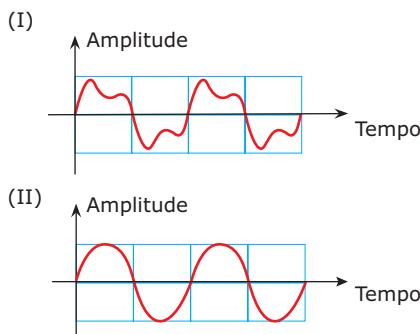
05. (PUCPR) As qualidades fisiológicas do som são altura, intensidade e timbre.

I. A altura é a qualidade que permite distinguir um som forte de um fraco de mesma frequência.

II. Intensidade é a qualidade que permite distinguir um som agudo de um som grave.

III. Timbre é a qualidade que permite distinguir dois sons de mesma altura emitidos por fontes diferentes.

A) Somente I é correta.
B) Somente II é correta.
C) Todas estão corretas.
D) I e II estão corretas.
E) Somente III é correta.

06. (UFMG) Uma onda sonora de uma determinada frequência está se propagando dentro de um tubo com gás. A figura representa, em um dado instante, a densidade de moléculas do gás dentro do tubo: região mais escura corresponde à maior densidade. Se a fonte sonora que emitiu esse som aumentar sua intensidade,

A) a densidade do gás na região M aumenta e a densidade em N diminui.
B) a densidade do gás na região M diminui e a densidade em N aumenta.
C) a distância entre as regiões M e N aumenta.
D) a distância entre as regiões M e N diminui.

07. (PUC Minas) Em linguagem técnica, um som que se propaga no ar pode ser caracterizado, entre outros aspectos, por sua altura e por sua intensidade. Os parâmetros físicos da onda sonora que correspondem às características mencionadas são, respectivamente,

A) comprimento de onda e velocidade.
B) amplitude e velocidade.
C) velocidade e amplitude.
D) amplitude e frequência.
E) frequência e amplitude.

08. (UFF-RJ) Ondas sonoras emitidas no ar por dois instrumentos musicais distintos, I e II, têm suas amplitudes representadas em função do tempo pelos gráficos a seguir.

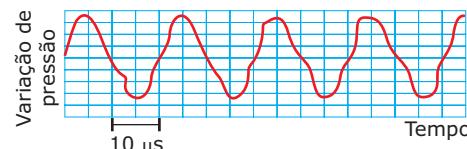
A propriedade que permite distinguir o som dos dois instrumentos é

A) o comprimento de onda.
B) a amplitude.
C) o timbre.
D) a velocidade de propagação.
E) a frequência.

09. (FCMMG–2009) Antes de começar um concerto, os músicos afinam seus instrumentos. Quando o violinista afrouxa uma das cordas de seu instrumento, tentando ajustá-la, vibrando a corda, o novo som emitido terá menor

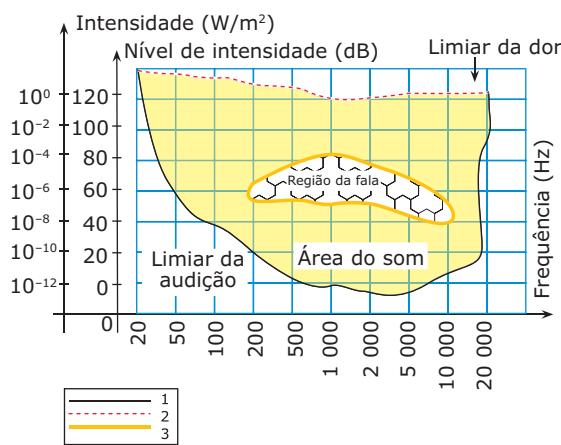
A) comprimento de onda.
B) frequência.
C) velocidade.
D) amplitude.

10. (UEM-PR) O violão é um instrumento de cordas cujas extremidades são fixas. Quando tangidas, as cordas vibram, provocando compressões e rarefações no ar. O som emitido pelas cordas é amplificado pela caixa do instrumento, que vibra juntamente com elas e com o ar contido em seu interior. Considere um violão com cordas do mesmo material, mas de diferentes espessuras, e assinale a alternativa **CORRETA**.

A) Ao tanger uma das cordas livres do violão, ela vibrará com uma determinada frequência; se o músico tanger a mesma corda pressionada em alguma altura do braço do violão, esta vibrará com uma frequência maior.
B) Quanto maior a tensão a que uma corda está sujeita, menor será a frequência de vibração da mesma.
C) As cordas do violão possuem o mesmo comprimento e diferentes espessuras para que possam vibrar na mesma frequência quando sujeitas à mesma tensão.
D) A frequência não depende do comprimento da corda tangida.
E) A velocidade do som na corda é diretamente proporcional à densidade da corda.

11. (UFU-MG) Um estudante de Física se encontra a uma certa distância de um paredão, de onde ouve o eco de sua voz. Desejando calcular a que distância se encontra do paredão, ele bate palmas de forma ritimada, de maneira que escuta a sequência palma-eco-palma-eco... Se ele bate palmas a cada segundo e a velocidade do som no ar é 340 m/s, a sua distância ao paredão é de

A) 22,5 m.
B) 85 m.
C) 170 m.
D) 340 m.
E) 425 m.

12. (PUC RS) Denomina-se eco o fenômeno em que se ouve nitidamente um som refletido por obstáculos, uma ou mais vezes sucessivas. Sabe-se que o ouvido humano só distingue dois sons que se sucedem num intervalo de tempo igual ou superior a 0,10 segundo. Considera-se que a velocidade do som no ar seja de 350 m/s. De posse desses dados, pode-se concluir que uma pessoa ouve o eco de sua própria voz se estiver afastada do obstáculo refletor em, no mínimo,

A) 17,5 m.
B) 34,0 m.
C) 40,0 m.
D) 68,0 m.
E) 74,0 m.

13. (FUVEST-SP) O som de um apito é analisado com o uso de um medidor que, em sua tela, visualiza o padrão apresentado na figura a seguir. O gráfico representa a variação da pressão que a onda sonora exerce sobre o medidor, em função do tempo, em μs ($1\ \mu s = 10^{-6}\ s$). Analisando a tabela de intervalos de frequências audíveis, por diferentes seres vivos, conclui-se que esse apito pode ser ouvido apenas por

Seres vivos	Intervalos de frequência
Cachorro	15 Hz – 45 000 Hz
Ser humano	20 Hz – 20 000 Hz
Sapo	50 Hz – 10 000 Hz
Gato	60 Hz – 65 000 Hz
Morcego	1 000 Hz – 120 000 Hz

A) seres humanos e cachorros.
B) seres humanos e sapos.
C) sapos, gatos e morcegos.
D) gatos e morcegos.
E) morcegos.

14. (UFRN) A intensidade de uma onda sonora, em W/m^2, é uma grandeza objetiva que pode ser medida com instrumentos acústicos sem fazer uso da audição humana. O ouvido humano, entretanto, recebe a informação sonora de forma subjetiva, dependendo das condições auditivas de cada pessoa. Fato já estabelecido é que, fora de certo intervalo de frequência, o ouvido não é capaz de registrar a sensação sonora. E, mesmo dentro desse intervalo, é necessário um valor mínimo de intensidade da onda para acionar os processos fisiológicos responsáveis pela audição. Face à natureza do processo auditivo humano, usa-se uma grandeza mais apropriada para descrever a sensação auditiva. Essa grandeza é conhecida como nível de intensidade do som (medida em decibel). A figura a seguir mostra a faixa de audibilidade média do ouvido humano, relacionando a intensidade e o nível de intensidade com a frequência do som.

1. Limiar da audição (intensidade mais baixa do som onde começamos a ouvir).
2. Limiar da dor (intensidade sonora máxima que nosso ouvido pode tolerar).
3. Região da fala.

Considerando as informações e o gráfico anterior, é **CORRETO** afirmar que

A) na faixa de 2 000 Hz a 5 000 Hz o ouvido humano é capaz de perceber sons com menor intensidade.

B) a frequência máxima de audição do ouvido humano é 10 000 Hz.

C) acima da intensidade 10^{-12} W/m^2 podemos ouvir qualquer frequência.

D) ao falarmos geramos sons no intervalo aproximado de frequência de 200 Hz a 20 000 Hz.

15. (UFU-MG) Um show de *rock* foi interrompido porque o nível sonoro estava muito elevado. A polícia permitiria a continuação do espetáculo somente se o nível sonoro fosse reduzido em 30 dB. Por qual fator os organizadores do *show* deverão diminuir a energia da fonte sonora?

A) 3 000 C) 1 000

B) 30 D) 10

16. (UECE) O "nível de intensidade sonora" N é medido numa escala logarítmica e está relacionado com a intensidade física I da onda pela expressão:

$$N = 10\log I/I_0$$

Em que I_0 é a intensidade do mais fraco som audível.

$$\text{Se } I = 10I_0, \text{ tem-se } N = 10\log 10$$

$$N = 10 \text{ dB (dB = decibel)}$$

Um cachorro ao ladrar emite um som cujo nível de intensidade é 65 dB. Se forem dois cachorros latindo ao mesmo tempo, em uníssono, o nível de intensidade será (Use log 2 = 0,30)

A) 65 dB. C) 85 dB.

B) 68 dB. D) 130 dB.

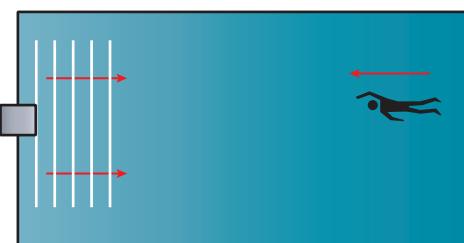
17. (CEFET-MG–2010) Ao se observar a cor da luz emitida por uma estrela, nota-se um desvio para o vermelho. Tal fenômeno deve-se ao fato de esse astro

A) estar morrendo.

B) ter sua luz refratada.

C) ter a velocidade da luz.

D) estar se afastando da Terra.

E) estar muito distante da Terra.

18. (ITA-SP) Uma fonte sonora F emite no ar um som de frequência f, que é percebido por um observador em O. Considere as duas situações seguintes:

I. A fonte aproxima-se do observador, na direção F – O, com uma velocidade v, estando o observador parado. A frequência do som percebido pelo observador é f_1.

II. Estando a fonte parada, o observador aproxima-se da fonte, na direção O – F, com uma velocidade v. Nesse caso, o observador percebe um som de frequência f_2.

Supondo que o meio esteja parado e que v seja menor que a velocidade do som no ar, pode-se afirmar que

A) $f_1 > f_2 > f$.

B) $f_1 = f_2 > f$.

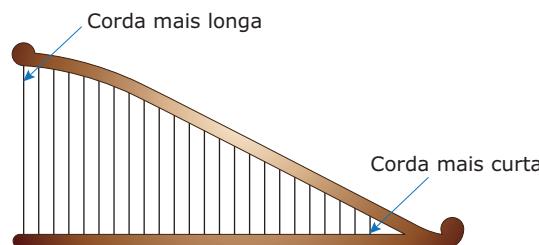
C) $f_2 > f_1 > f$.

D) $f_1 = f_2 < f$.

E) $f_1 > f > f_2$.

19. (FCMMG–2007) Numa piscina artificial, uma estrutura gera pulsos retos na superfície da água, na razão de 2 pulsos por segundo, criando ondas que se deslocam a uma velocidade de 1,0 m/s. Rafael nada com a velocidade de 1,5 m/s, indo de encontro às ondas produzidas, como está representado na figura. A frequência com que Rafael perceberá as ondas retas será de

A) 1,0 Hz.
B) 2,0 Hz.
C) 2,5 Hz.
D) 5,0 Hz.

20. (UDESC–2008) Um detector sonoro é instalado sobre a linha de chegada do autódromo de Interlagos, em São Paulo. No Grande Prêmio de Fórmula 1 do Brasil, nos instantes antes de o vencedor cruzar a linha de chegada, o detector percebe uma frequência sonora f_1, produzida pelo motor do carro. O carro se aproxima e cruza a linha de chegada com velocidade constante.

Qual das expressões a seguir representa **CORRETAMENTE** o cálculo da velocidade do carro, ao cruzar a linha de chegada? (v é a velocidade do som no ar, f é a frequência do som produzido pelo motor com o carro em repouso, e V é a velocidade do carro.)

A) $V = \dfrac{v(f_1 + f)}{f + f_1}$

B) $V = \dfrac{v(f + f_1)}{f_1}$

C) $V = \dfrac{v(f_1 + f)}{f_1}$

D) $V = \dfrac{v(f_1 - f)}{f_1}$

E) $V = \dfrac{v(f_1 + f)}{f}$

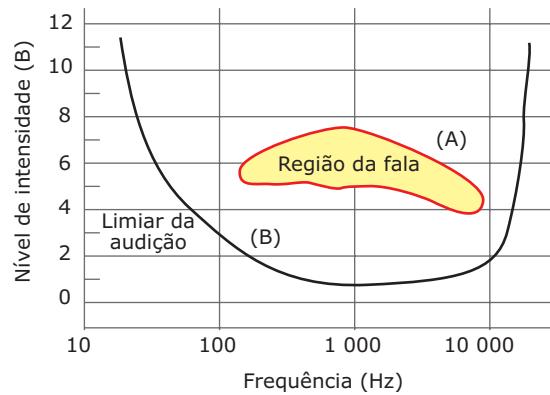
21. (UFLA-MG) O radar utilizado em estradas para detectar veículos em alta velocidade funciona emitindo ondas de frequência f_0, que são refletidas pelo veículo em aproximação. O veículo, após a reflexão da onda, passa então a ser emissor de ondas para o radar, que irá detectá-las. Sabe-se que objetos que se aproximam de uma fonte emissora refletem ondas com frequência maior do que a emitida pela fonte. A variação Δf entre a frequência emitida pelo radar f_0 e a observada pela recepção dá uma medida da velocidade v do veículo. Essa relação é dada por: $\Delta f = k.f_0.v$, sendo $k = (2/3)10^{-8}$ s/m e $f_0 = 50 \times 10^8$ Hz. Para um veículo que se aproxima à velocidade de 108 km/h (1 km/h = 1/3,6 m/s), esse radar deve ter uma precisão Δf **MÍNIMA** de

A) 1 000 Hz.
B) 100 Hz.
C) 10 Hz.
D) 1 Hz.
E) 10 000 Hz.

22. (UFRJ) Um artesão constrói um instrumento musical rústico usando cordas presas a dois travessões. As cordas são todas de mesmo material, de mesmo diâmetro e submetidas à mesma tensão, de modo que a velocidade com que nelas se propagam ondas transversais seja a mesma. Para que o instrumento possa emitir as diversas notas musicais, ele utiliza cordas de comprimentos diferentes, como mostra a figura.

Uma vez afinado o instrumento, suponha que cada corda vibre em sua frequência fundamental. Que corda emite o som mais grave, a mais longa ou a mais curta? **JUSTIFIQUE** sua resposta.

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2009) *Os radares comuns transmitem micro-ondas que refletem na água, gelo e outras partículas na atmosfera. Podem, assim, indicar apenas o tamanho e a distância das partículas, tais como gotas de chuva. O radar Doppler, além disso, é capaz de registrar a velocidade e a direção na qual as partículas se movimentam, fornecendo um quadro do fluxo de ventos em diferentes elevações. Nos Estados Unidos, a Nexrad, uma rede de 158 radares Doppler, montada na década de 1990 pela Diretoria Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA), permite que o Serviço Meteorológico Nacional (NWS) emita alertas sobre situações do tempo potencialmente perigosas com um grau de certeza muito maior.*

O pulso da onda do radar ao atingir uma gota de chuva, devolve uma pequena parte de sua energia numa onda de retorno, que chega ao disco do radar antes que ele emita a onda seguinte. Os radares da Nexrad transmitem entre 860 e 1 300 pulsos por segundo, na frequência de 3 000 MHz.

FISCHETTI, M. Radar metereológico: sinta o vento. *Scientific American Brasil*. n. 08. São Paulo. Jan. 2003.

No radar Doppler, a diferença entre as frequências emitidas e recebidas pelo radar é dada por $\Delta f = (2u_r / c)f_0$, onde u_r é a velocidade relativa entre a fonte e o receptor, $c = 3,0 \times 10^8$ m/s é a velocidade da onda eletromagnética, e f_0 é a frequência emitida pela fonte. Qual é a velocidade, em km/h, de uma chuva, para a qual se registra no radar Doppler uma diferença de frequência de 300 Hz?

A) 1,5 km/h
B) 5,4 km/h
C) 15 km/h
D) 54 km/h
E) 108 km/h

02. Para que uma pessoa possa ouvir as conversas de uma outra, são necessários alguns parâmetros: a frequência e a intensidade do som emitido pela pessoa e os valores máximos e mínimos da frequência e da intensidade sonora que o ouvinte consegue captar. O limiar de audição caracteriza, para cada frequência, os valores mínimos da intensidade sonora capazes de sensibilizar o sistema auditivo de uma pessoa. O gráfico a seguir mostra, numa mesma escala, as frequências e os níveis de intensidade sonora de uma pessoa que está falando (A) e de outra que está ouvindo (B).

De acordo com o gráfico, o ouvinte (B) consegue captar todos os sons emitidos pela pessoa que está falando (A), desde que esteja perto dela, porque, necessariamente,

A) as pessoas com audição normal são capazes de escutar tudo aquilo que as outras pessoas falam, independentemente da frequência e da intensidade dos sons emitidos.

B) todos os sons pronunciados têm nível de intensidade maior do que o limiar de audição do ouvinte (B) dentro da faixa de frequências emitidas.

C) todos os sons pronunciados têm frequência menor do que as frequências que o ouvinte B pode perceber dentro da faixa de níveis de intensidade emitidos.

D) a faixa correspondente à região da fala do emissor (A) é composta de frequências que estão dentro da faixa de audição do receptor (B).

E) a intensidade, a frequência e o timbre sonoro dos sons emitidos são maiores do que aqueles que o ouvinte (B) é capaz de perceber na situação descrita pelo gráfico.

GABARITO

Fixação

01. D
02. B
03. D
04. A
05. C

Propostos

01. C
02. C
03. C
04. B
05. E
06. A
07. E
08. C
09. B
10. A
11. B
12. A
13. D
14. A
15. C
16. B
17. D
18. A
19. D
20. D
21. A
22. A velocidade das ondas nas cordas é a mesma, a frequência do som emitido é igual à frequência fundamental de vibração da corda e o som mais grave corresponde à menor frequência. A frequência fundamental é dada por $f = v/2L$. Assim, a corda mais longa vai produzir o som mais grave.

Seção Enem

01. D
02. B

FÍSICA

MÓDULO 16 FRENTE D

Radiação de corpo negro e quantização da energia

No final do século XIX, a Física estava apoiada sobre duas grandes áreas: a Mecânica e o Eletromagnetismo. O conjunto de leis e de conceitos físicos desenvolvidos até o final do século XIX é chamado de Física Clássica. Nessa época, muitos cientistas acreditavam que a Física havia se esgotado, e que, doravante, ela seria usada para o avanço da humanidade. De certa forma, essa previsão se confirmou. O extraordinário desenvolvimento tecnológico ocorrido no século XX deveu-se, em grande parte, ao uso da Física Clássica. Carros, aviões, edificações de grande porte, entre tantos outros exemplos, foram e continuam sendo projetados a partir dos fundamentos da Mecânica, da Eletrodinâmica e da Termodinâmica clássicas. Todavia, no início do século XX, duas revoluções contrariaram a crença de que a Física fosse apenas aquela desenvolvida até então e que nenhuma nova descoberta seria possível. Em 1900, o físico alemão Max Planck, ao estudar a radiação emitida por corpos negros, enunciou uma nova e revolucionária teoria, a quantização da energia eletromagnética, cujos desdobramentos originaram a Mecânica Quântica. Pouco depois, em 1905, Einstein divulgou a primeira parte da sua famosa Teoria da Relatividade. A Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade constituem as bases da Física Moderna. Muitos equipamentos e tecnologias atuais usam conceitos relativísticos e quânticos. O GPS, os transistores, o *laser*, os aceleradores de partículas, os aparelhos de radioterapia e as usinas nucleares são apenas alguns dos incontáveis exemplos da difusão da Física Moderna. Daí, a importância de estudá-la.

Neste módulo, iniciaremos o estudo da Física Moderna, apresentando a teoria de Planck sobre a radiação de corpo negro e a quantização da energia eletromagnética. Nos módulos seguintes, veremos alguns desdobramentos da Teoria Quântica e estudaremos a Teoria da Relatividade e algumas reações nucleares. Para introduzir esses conceitos, precisaremos adquirir um pouco de conhecimento sobre as ondas eletromagnéticas e, por isso, esse assunto constitui a abertura deste módulo.

A ONDA ELETROMAGNÉTICA

A luz é uma onda eletromagnética

Em 1873, o físico escocês James Clerk Maxwell descobriu que as leis da eletricidade e do eletromagnetismo podiam ser resumidas em um conjunto de quatro equações, atualmente denominadas equações de Maxwell. A compreensão total dessas equações demanda conhecimento da Matemática estudada no nível superior, e, portanto, as discutiremos apenas de forma conceitual. Maxwell desenvolveu essas equações e mostrou que elas predizem a existência de ondas formadas por campos magnéticos e elétricos oscilantes no tempo, cuja propagação no espaço constitui uma onda eletromagnética. Depois de realizar manipulações algébricas em suas equações, Maxwell chegou à seguinte expressão para calcular a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 . \mu_0}}$$

Nessa expressão, ε_0 = 8,85 x 10^{-12} $C^2/N.m^2$ é a permissividade elétrica do vácuo, e μ_0 = 4π x 10^{-7} T.m/A é a permeabilidade magnética do vácuo. Você deve se lembrar de que usamos a permissividade elétrica em equações para calcular forças, campos e capacitâncias elétricas, enquanto a permeabilidade magnética foi usada em equações para calcular campos magnéticos gerados por correntes elétricas. Maxwell substituiu essas constantes na equação anterior e obteve o seguinte resultado para o valor da velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{8,85 \times 10^{-12} . 4\pi \times 10^{-7}}} = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Esse valor é exatamente igual à velocidade da luz no vácuo. Maxwell não achou que isso fosse uma mera coincidência, concluindo, corretamente, que a luz era um tipo de onda eletromagnética.

As ondas eletromagnéticas podem ser geradas a partir da aceleração de uma carga elétrica, como o que acontece em uma corrente elétrica alternada em um fio. Obviamente, a oscilação dessa carga produz um campo magnético variável no tempo e no espaço. Pensando na Lei da Indução de Faraday, Maxwell argumentou que a variação desse campo magnético produziria um campo elétrico, que também seria variável. A variação desse campo elétrico deveria, por sua vez, causar o aparecimento de um campo magnético variável. Assim, o campo elétrico e o campo magnético, ambos, se propagariam pelo espaço, um gerando o outro. Tal propagação é a chamada onda eletromagnética.

Após a divulgação dos trabalhos de Maxwell, muitos físicos iniciaram a empreitada de produzir artificialmente algum tipo de onda eletromagnética. Em 1888, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu gerar as primeiras ondas eletromagnéticas, construindo emissores e detectores de ondas de rádio. Em 1895, Röntgen descobriu os raios X, fazendo a primeira radiografia da história. Além da luz, das ondas de rádio e dos raios X, outras ondas eletromagnéticas foram descobertas desde então, tais como as micro-ondas e a radiação gama, essa última proveniente de reações nucleares.

A figura 1 mostra uma onda eletromagnética que se propaga da esquerda para a direita, no sentido positivo do eixo x. Nessa imagem, o campo magnético oscila em um plano vertical (eixo y), enquanto o campo elétrico oscila em um plano horizontal (eixo z). Logo, os campos oscilam em planos normais entre si e perpendicularmente à direção de propagação da onda. Por isso, as ondas eletromagnéticas são ondas transversais.

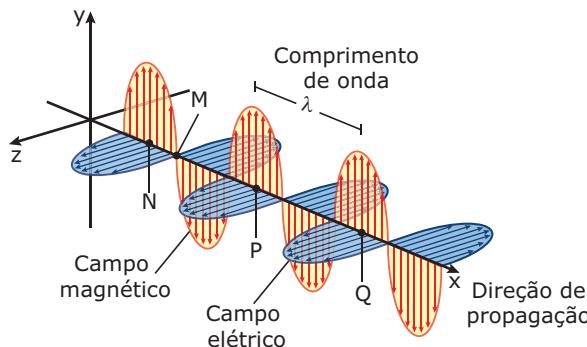



Figura 1: A onda eletromagnética é a propagação de um campo elétrico e de outro magnético, ortogonais entre si.

Um aspecto importante da figura 1 é que ela representa o registro de um instante de tempo da propagação da onda, isto é, ela é a imagem congelada da onda. Nesse instante, observe que os campos apresentam intensidade nula em certos pontos do eixo x (por exemplo, no ponto M), enquanto possuem intensidade máxima em outros pontos desse eixo (por exemplo, no ponto N). Após 1/4 de período, os campos no ponto M possuirão intensidade máxima, enquanto no ponto N eles apresentarão intensidade nula. Esse comportamento é semelhante àquele apresentado por ondas mecânicas, como uma onda se propagando em uma corda elástica. Todavia, ao contrário do que ocorre em uma onda mecânica, a propagação de uma onda eletromagnética não implica a vibração de um meio material. Na onda eletromagnética, o que oscila são os campos elétrico e magnético. De fato, como as ondas eletromagnéticas podem se propagar no vácuo, a presença de um meio material não é uma condição necessária para a sua propagação.

PARA REFLETIR

Certamente, você já deve ter notado ruídos de estática em seu rádio quando ocorre um relâmpago. Às vezes, esses ruídos ocorrem quando ligamos um interruptor de luz. Por que isso ocorre?

O espectro eletromagnético

Na figura 1, observe a distância λ, que é o comprimento de onda associado à onda eletromagnética dessa figura. Podemos associar esse valor à distância entre dois pontos, ao longo da direção de propagação da onda, que estão em concordância de fase e que apresentam valores iguais de campo elétrico (ou de campo magnético). Observe que esse é o caso dos pontos P e Q mostrados. Bem antes de Maxwell ter descoberto a natureza eletromagnética da luz, Thomas Young, no início do século XIX, já havia determinado o comprimento de onda de luzes monocromáticas ($\approx 10^{-3}$ mm) através de experiências com franjas de interferência projetadas em um anteparo.

A frequência de uma onda eletromagnética, assim como para qualquer outro tipo de onda, é imposta por sua fonte. Ainda que a onda mude de meio (o que, em geral, faz a velocidade e o comprimento de onda variarem), a sua frequência permanece a mesma. Em um sinal de rádio de uma estação, a frequência da onda é determinada pela taxa de oscilações das cargas elétricas livres na antena transmissora. No caso da luz emitida por um filamento de uma lâmpada ou produzida em uma lâmpada de neônio, a frequência da luz está relacionada com fenômenos quânticos no interior dos átomos. Podemos calcular a frequência **f** de uma onda eletromagnética em função do seu comprimento de onda **λ** e de sua velocidade de propagação **v** através da equação que você já conhece:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

A figura 2 mostra alguns tipos de ondas presentes no espectro eletromagnético (existem mais), assim como as suas frequências e os seus comprimentos de onda (no vácuo). Observe a grande variedade de comprimentos de onda indicados na parte superior da figura, que se estendem desde valores ínfimos da ordem de dimensões atômicas (os raios X e gama) até comprimentos da ordem de quilômetros (as ondas de rádio). As frequências correspondentes, indicadas na parte inferior da figura, foram calculadas por meio da equação anterior, utilizando como valor para a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo c = 3,0 x 10^8 m/s.

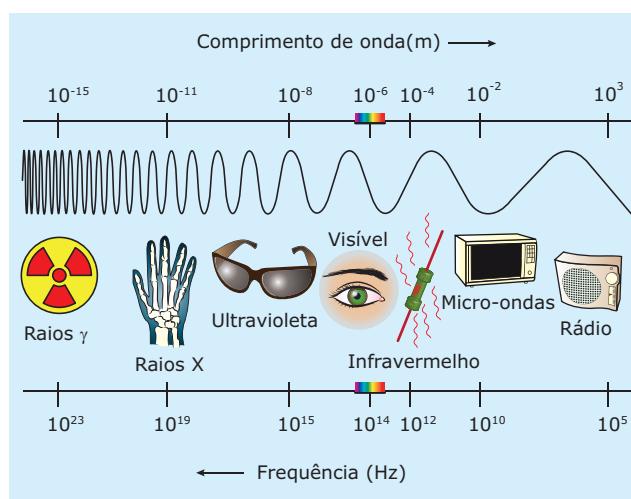
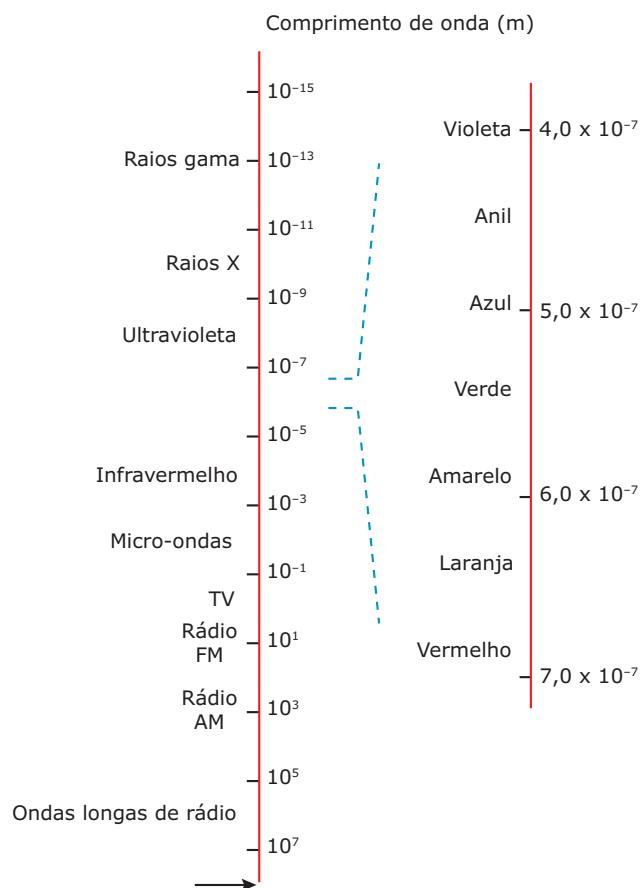



Figura 2: Espectro eletromagnético.

A velocidade da luz

De acordo com a Teoria da Relatividade, a matéria não pode se mover mais rápido que a luz. Assim, podemos estender essa ideia às ondas em geral. No vácuo, nada se move com velocidade igual ou maior que c = $3,0 \times 10^8$ m/s, velocidade com a qual a luz, os raios X e todas as outras ondas eletromagnéticas se propagam. No ar, a velocidade das ondas eletromagnéticas é um pouco menor, comparada com a sua velocidade no vácuo. Mesmo assim, o valor dessa velocidade é o mesmo para todas as frequências, ou seja, a luz azul, a luz vermelha, a onda de rádio e todas as outras formas de ondas eletromagnéticas propagam-se no ar com velocidades idênticas. Esse comportamento é verificado na maioria dos gases.

Nos meios sólidos e líquidos, como o vidro e a água, a velocidade das ondas eletromagnéticas varia com a frequência da radiação. Nesses meios, chamados de dispersivos, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas torna-se menor com o aumento da frequência. Assim, na água, por exemplo, os raios X viajam mais lentamente que a radiação ultravioleta. Esta, por sua vez, possui menor velocidade que a luz azul, e assim por diante. É por isso que um feixe de luz branca (luz solar, por exemplo) se dispersa ao penetrar em um prisma de vidro. A porção violeta presente nesse feixe apresenta alta frequência em relação às outras luzes. Assim, ela sofre uma maior redução de velocidade e, consequentemente, apresenta maior desvio. A luz vermelha, de menor frequência e, portanto, maior velocidade no prisma, é a parte da luz que sofre o menor desvio. O resultado disso é que o feixe de luz sofre dispersão, como estudado anteriormente em Óptica Geométrica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A figura a seguir mostra um diagrama do espectro eletromagnético.

A) Explicar por que as ondas de rádio, na extremidade inferior do diagrama, são denominadas de ondas longas.

B) Calcular as frequências extremas das ondas de rádio e dos raios gama apresentados no diagrama.

C) Especificar a onda de radar a ser usada para localizar um avião intercontinental, sabendo que a reflexão sobre a aeronave é mais eficiente quando o comprimento de onda associado é da ordem de grandeza do avião. Explicar por que a informação contida na onda refletida permite saber se o avião está se aproximando ou se afastando do radar.

D) Uma pessoa sacode vigorosamente um bastão eletrizado. Explicar por que uma onda eletromagnética emana do bastão. Estimar o comprimento de onda associado. Se possível, indicar a posição dessa onda no diagrama anterior.

Resolução:

A) As ondas eletromagnéticas de comprimento de onda superiores a 10 m são usadas em radiotransmissões. As ondas na extremidade inferior do diagrama são ondas de rádio com elevados comprimentos de ondas, podendo chegar à ordem de 10 milhões de metros. Por isso, essa faixa do espectro é denominada de ondas longas de rádio.

B) Os comprimentos de ondas, λ, nos extremos do diagrama são 10^{-15} m (raio gama) e 10^7 m (onda longa de rádio). Para calcular as frequências, f, correspondentes, devemos usar a equação $c = \lambda.f$, em que $c = 3,0 \times 10^8$ m/s é o módulo da velocidade das ondas eletromagnéticas no ar. Substituindo os valores nessa equação, obtemos 30 Hz para a frequência da onda longa e $3,0 \times 10^{23}$ Hz para a dos raios gama. O pequeno comprimento de onda (e a elevada frequência dos raios gama) explica por que esse tipo de radiação apresenta um enorme poder de penetração na matéria.

C) A ordem de grandeza de um avião intercontinental é de 10^2 m. Assim, a onda deve ter um comprimento de onda da ordem de 100 metros. Esse valor corresponde a ondas de rádio de alta frequência. A análise da onda refletida permite dizer se o avião está se aproximando ou se afastando do radar, por meio do efeito Doppler. Quando o avião se afasta do radar o sinal refletido é percebido com um comprimento de onda maior que aquele do sinal enviado pelo radar. Se ocorrer o contrário, o avião estará se aproximando.

D) Como o bastão representa uma carga elétrica e como ele apresenta uma aceleração, de acordo com a Teoria de Maxwell, uma onda eletromagnética se deriva do movimento do bastão. A frequência dessa onda é a frequência de oscilação da carga, isto é, do bastão. O movimento do bastão é imposto por uma pessoa, e a frequência de oscilação é da ordem de 1 Hz. Usando a equação $c = \lambda.f$, obtemos um comprimento de onda da ordem de 10^8 m. No diagrama do espectro eletromagnético, essa radiação aparece abaixo do eixo. A sua posição está indicada pela flecha desenhada na extremidade inferior da figura anterior.

A QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

Quando Maxwell descobriu a natureza eletromagnética da luz, o seu caráter ondulatório já era consagrado. Experiências de difração e de interferência com a luz comprovavam esse fato. Então, os físicos fizeram uma nova pergunta sobre a luz e as ondas eletromagnéticas: como elas eram produzidas? Além do Sol, outras fontes de luz são as lâmpadas de filamento, fluorescentes e a vapor. A seguir, vamos entender como esses corpos emitem luz. Veremos que, ao responderem essa pergunta, os físicos proporcionaram o desenvolvimento da Física Quântica.

Curvas de radiação

No estudo sobre transferência de calor, vimos que todos os corpos emitem constantemente radiação eletromagnética. Qualquer corpo emite uma mistura de todas as radiações eletromagnéticas, com o comprimento de onda (e a frequência) variando de zero a infinito. Isso está evidenciado na figura 3, que mostra as curvas de radiação de três sólidos a temperaturas diferentes.

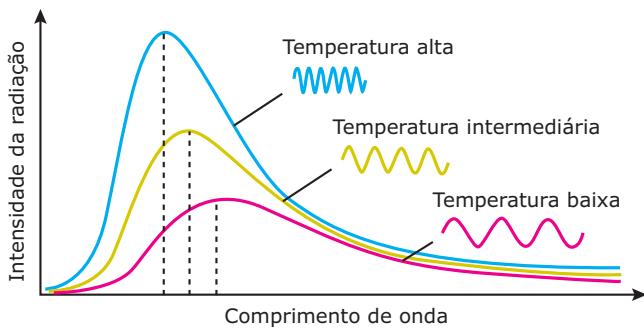



Figura 3: Curvas de radiações de sólidos.

Observe que as curvas da figura 3 apresentam picos. Esses pontos de máximo revelam a existência de um comprimento de onda $\lambda_{máx}$ (e uma frequência $f_{máx}$) para o qual a energia eletromagnética emitida pelo sólido é máxima. Observe ainda que $\lambda_{máx}$ é cada vez menor à medida que a temperatura do corpo aumenta. Em outras palavras, à medida que essa temperatura torna-se maior, os picos nas curvas de radiação deslocam-se para a esquerda. Quando um objeto está bastante quente, acima de 1 000 °C, ele emite radiação eletromagnética com predominância para baixos comprimentos de ondas (e altas frequências), correspondentes à faixa visível do espectro eletromagnético. É por isso que o filamento de uma lâmpada emite luz. Um objeto frio, como o seu livro, ou mesmo você, emite radiação eletromagnética predominantemente na faixa do infravermelho e de longos comprimentos de ondas. Objetos a temperaturas de 200 °C, como as paredes do forno do fogão a gás da sua casa, também irradiam predominantemente na faixa do infravermelho, porém, com comprimentos de ondas um pouco mais curtos. O carvão em brasa possui uma temperatura entre 600 °C e 700 °C, faixa em que existe energia suficiente para que o corpo adquira uma cor vermelha escura.

A temperatura absoluta T de um corpo negro e o comprimento de onda $\lambda_{máx}$ relacionam-se por meio de uma equação empírica conhecida como a Lei do Deslocamento de Wien, expressa por:

$$\lambda_{máx} = \frac{b}{T}$$

Nessa expressão, T é dado em kelvin, o comprimento de onda é calculado em metros, e b, a constante de Wien, vale 0,0029 m.K. Observe que $\lambda_{máx}$ é inversamente proporcional a T. Assim, na figura 3, se $\lambda_{máx}$ do corpo quente for metade do valor correspondente ao corpo frio, então a temperatura absoluta do corpo quente deve ser o dobro da temperatura absoluta do corpo frio.

Outra equação relacionada à radiação de corpo negro é a chamada Lei de Stefan-Boltzmann. Segundo ela, a taxa de energia eletromagnética emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta T. A expressão matemática dessa lei é:

$$P = \sigma.S.T^4$$

A taxa de emissão eletromagnética P é calculada em watt (W). O primeiro fator da equação é a constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ W/(m².K⁴), S é a área da superfície do corpo negro (m²), e T é a sua temperatura absoluta (K). Observe que a constante σ é muito pequena. Por isso, o fluxo de energia eletromagnética emitida (W/m²) é expressivo apenas quando o corpo apresenta temperaturas mais altas, como o carvão em brasa ou as paredes de um forno aquecido.

Você não precisa memorizar as últimas duas equações. Nos vestibulares, em geral, essas equações são fornecidas nas questões em que o assunto é explorado.

PARA REFLETIR

Por que uma estrela muito massiva e quente tende para a cor azul? O que você pode dizer sobre a cor de uma estrela mais fria?

A equação de Planck da radiação

No final do século XIX, alguns físicos buscavam uma maneira de determinar teoricamente as curvas de radiação de um corpo negro. Esse corpo é um sistema que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide. Um objeto, pintado de preto fosco e exposto às radiações na faixa do visível, é uma boa aproximação de um corpo negro.

Um corpo negro não precisa, necessariamente, ser da cor preta. O pequeno orifício no objeto oco mostrado na figura 4, por exemplo, é um corpo negro, pois a radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair. Após sofrer múltiplas reflexões internas, a radiação é praticamente toda absorvida pelo corpo. À medida que o corpo absorve essa radiação, ele também se aquece. Quanto maior a sua temperatura, maior a quantidade de radiação que ele emite (observe que os picos na figura 3 são mais altos para as temperaturas maiores). Assim, o corpo atingirá uma temperatura de equilíbrio, na qual a taxa de radiação recebida torna-se igual à taxa de radiação emitida. No final do século XIX, os cientistas procuraram estudar o corpo negro nessa situação de equilíbrio.

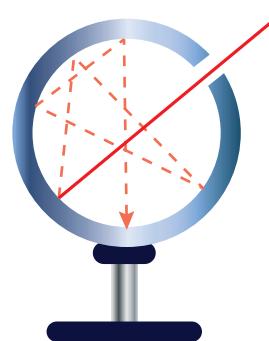



Figura 4: Uma pequena cavidade é um corpo negro.

Alguns físicos propuseram equações para reproduzir as curvas de radiação de corpos negros. Na figura 5, os pequenos círculos representam os pontos obtidos experimentalmente para a curva de radiação de um corpo negro. As outras curvas resultam de equações propostas por cientistas da época. Observe que a curva de Wien reproduz bem a curva de radiação. No entanto, por ser uma lei de natureza empírica, isto é, por se valer apenas de informações experimentais, ela não constitui uma teoria. A outra curva representa a Lei de Rayleigh-Jeans, que concorda com os resultados experimentais apenas para os comprimentos de ondas muito grandes, mas discorda completamente para comprimentos de ondas curtos. Ainda assim, essa lei tem o mérito de ser baseada nos argumentos teóricos da Física Clássica.

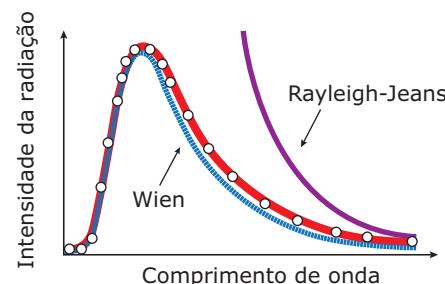



Figura 5: Leis para reproduzir a curva de radiação de um corpo negro.

Inspirado na Teoria Atômica, o físico alemão Max Planck propôs um modelo inteiramente teórico para a radiação do corpo negro. Ele supôs que os átomos do corpo negro agem como pequenos osciladores eletromagnéticos, cada um com uma frequência de oscilação própria. São esses osciladores que emitem e absorvem a energia eletromagnética em um corpo negro. Planck os imaginou oscilando com inúmeras frequências, o que explicaria por que a radiação emitida por um corpo negro apresenta as frequências variando de zero a infinito.

Em seu modelo, Planck introduziu uma ideia que nada tinha a ver com a Física daquela época. Ele considerou que um oscilador não pode ter um valor de energia qualquer, mas certos valores dados por:

$$E = n.h.f$$

Nessa expressão, **f** é a frequência do oscilador; **h** é uma constante, hoje chamada de constante de Planck, cujo valor é $6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s; e o fator **n** é um número **inteiro** positivo conhecido como número quântico, que define o valor (ou estado) de energia do oscilador. Um oscilador não irradia (nem absorve) energia enquanto permanece em um determinado estado. Dessa forma, ele irradia energia quando passa de um estado para outro. Essa energia não é emitida de forma contínua, mas sim de forma quantizada, isto é, por meio de pulsos ou de pacotes de energia dados por:

$$\text{Energia emitida} = \Delta n.h.f$$

Em que Δn é a diferença entre o número quântico do estado inicial e do estado final. Por exemplo, quando o oscilador passa do estado 5 para o estado 3 ($\Delta n = -2$), a sua energia diminui, e o oscilador emite radiação. Quando ocorre o contrário, o oscilador absorve radiação. Quando a transição ocorre entre dois níveis de energia adjacentes (por exemplo, entre os níveis 2 e 3, ou 5 e 6), temos $\Delta n = 1$. Nesse caso, a energia irradiada vale:

$$E = h.f$$

Esse valor corresponde ao pulso de menor energia possível. Planck o chamou de *quantum* (em latim, *quantum* significa quantidade; aqui, devemos pensar em *quantum* como uma quantidade mínima e indivisível).

Agora, vamos fazer alguns cálculos para exemplificar a quantização da energia. Considere um oscilador com frequência $f = 6{,}0 \times 10^{14}$ Hz. De acordo com a equação de Planck, a energia de um *quantum* emitida por esse oscilador é (lembre-se de que $Hz = s^{-1}$):

$$E = h.f = 6{,}63 \times 10^{-34}.6{,}0 \times 10^{14} = 4{,}0 \times 10^{-19}\ J$$

Essa energia é muito pequena. Vamos convertê-la para uma unidade mais adequada, o elétron-volt (eV). Como você sabe, $1\ eV = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J. Assim:

$$E = \frac{4{,}0 \times 10^{-19}}{1{,}6 \times 10^{-19}} = 2{,}5\ eV$$

Segundo Planck, esse oscilador pode emitir (ou absorver) pacotes energéticos de 2,5 eV. De acordo com a transição de estados, o oscilador pode emitir 2,5 eV (1 pacote), ou 5,0 eV (2 pacotes) e assim por diante. Todavia, ele não pode emitir uma energia, por exemplo, de 4,0 eV, pois esse valor representa 1,6 *quantum*, que é uma quantidade fracionária.

A ideia da quantização não é um conceito físico novo para você. A eletricidade é quantizada, pois a carga de qualquer corpo eletrizado é um múltiplo inteiro da carga do elétron. A massa também é quantizada. Por exemplo, a massa de um bloco de cobre (admitindo cobre puro) é igual ao número de átomos de cobre presentes no bloco multiplicado pela massa de apenas um átomo de cobre.

O conceito de fóton

No início do século XX, experiências mostravam que radiações de frequências altas, como um feixe de luz azul, particularmente, eram capazes de extrair elétrons quando incidiam sobre metais alcalinos. Nenhuma explicação baseada na Teoria Eletromagnética Clássica conseguia esclarecer essa emissão de elétrons, que, mais tarde, foi denominada de efeito fotoelétrico. Em 1905, Albert Einstein explicou o fenômeno, usando como base a teoria da quantização da energia de Planck. Para isso, ele considerou que a própria radiação eletromagnética, emitida por uma fonte, propaga-se pelo espaço concentrada em pacotes de energia, denominados de fótons. Esses pacotes são, de fato, partículas de massa zero, dotados de uma energia dada pela equação de Planck, E = h.f. Planck pensava que a quantização da energia era restrita aos átomos oscilantes da fonte de radiação. Einstein foi além dessa ideia, afirmando que a quantização da energia também ocorria com a radiação emitida pela fonte. Einstein percebeu que a frequência f dos osciladores da fonte é igual à frequência da radiação emitida. Substituindo f por c/λ (c e λ são a velocidade e o comprimento de onda da luz) na equação de Planck, obtemos a seguinte equação alternativa para calcular a energia de um fóton:

$$E = \frac{h.c}{\lambda}$$

A quantização da energia eletromagnética desencadeou uma revolução na Física. Após a sua descoberta, sucedeu-se uma corrida desenfreada pela compreensão do átomo, levando à edificação da Mecânica Quântica nos primeiros 30 anos do século XX. A figura 6 mostra a energia eletromagnética por fóton estendida para todo o espectro eletromagnético conhecido.

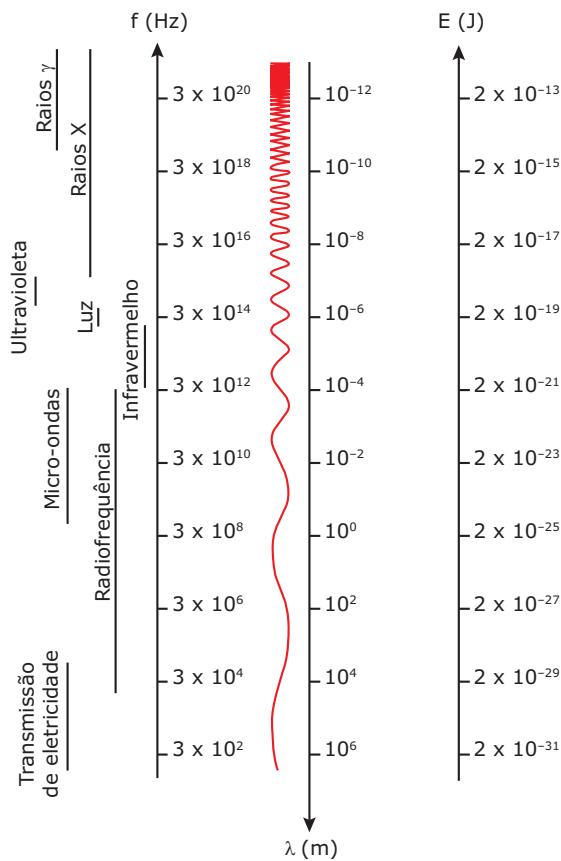
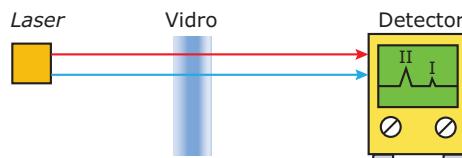



Figura 6: Frequência, comprimento de onda e energia por fóton do espectro eletromagnético.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. A figura mostra os trajetos de dois fótons de luz, sendo um de luz vermelha e o outro de luz azul, que são emitidos simultaneamente por um *laser*. Os fótons atravessam uma placa de vidro e atingem um detector muito sensível. Embora os fótons tenham sido disparados ao mesmo tempo, o detector registra a chegada de um primeiro fóton (I), e depois a chegada do outro (II). Além disso, a energia do segundo fóton (representada pelo pico II na tela) é maior que a do primeiro fóton.

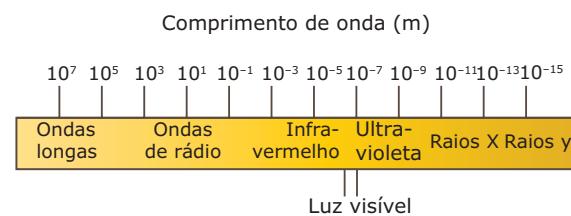
A) Explicar por que os fótons não chegam simultaneamente ao detector e identificar os picos I e II às luzes vermelha e azul. Explicar também por que as energias registradas são diferentes.

B) Considere agora que o *laser* emita um feixe de luz azul de potência 1,0 W. Calcular o número de fótons que chegam ao detector durante 10 s. Considere que o comprimento de onda dessa luz seja $5,0 \times 10^{-7}$ m.

Resolução:

A) Nesse experimento, os fótons percorrem distâncias iguais, mas não o fazem com velocidades sempre iguais. No ar, as velocidades são iguais, mas no vidro, que é um meio dispersivo, a velocidade da luz vermelha é maior que a velocidade da luz azul, pois a luz vermelha possui menor frequência que a azul. Por isso, o fóton de luz azul sofre um pequeno atraso de tempo ao atravessar o vidro em relação ao fóton de luz vermelha. Esse último, portanto, chega primeiro ao detector. Assim, o pico I corresponde ao fóton de luz vermelha, e o pico II, ao fóton de luz azul. Esse resultado está coerente com os registros das energias dos dois fótons. Como a luz azul possui a maior frequência, a energia do fóton associado a ela deve ser maior, de acordo com a equação de Planck.

B) A energia eletromagnética associada a essa emissão pode ser calculada por:

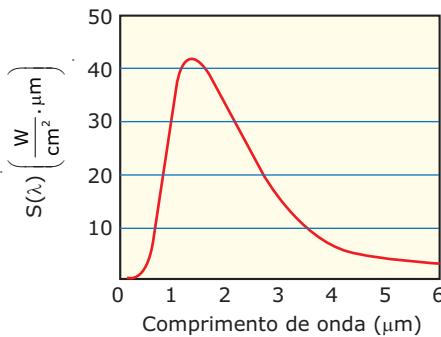
$$E = P.t = 1,0\ \frac{J}{s}.10\ s = 10\ J$$

Substituindo essa energia na equação de Planck, obtemos o número N de fótons emitidos:

$$E = N\frac{h.c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow 10 = N.\frac{6,6 \times 10^{-34}\ .\ 3,0 \times 10^{8}}{5,0 \times 10^{-7}}$$

$$\Rightarrow N = 25 \times 10^{18} \text{ fótons}$$

Esse número também pode ser expresso como $25 \times 10^9 \times 10^9$ fótons, ou seja, 25 bilhões de bilhões de fótons são emitidos pelo *laser* a cada 10 s.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFMG) O diagrama apresenta o espectro eletromagnético com as identificações de diferentes regiões em função dos respectivos intervalos de comprimento de onda no vácuo.

É **CORRETO** afirmar que, no vácuo,

A) os raios γ se propagam com maiores velocidades que as ondas de rádio.

B) os raios x têm menor frequência que as ondas longas.

C) todas as radiações têm a mesma frequência.

D) todas as radiações têm a mesma velocidade de propagação.

02. (UFRN) A radiação térmica proveniente de uma fornalha de altas temperaturas em equilíbrio térmico, usada para fusão de materiais, pode ser analisada por um espectrômetro. A intensidade da radiação emitida pela fornalha, a uma determinada temperatura, é registrada por esse aparato em função do comprimento de onda da radiação. Daí se obtém a curva espectral apresentada na figura a seguir.

A análise desse tipo de espectro levou o físico alemão Wilhelm Wien, em 1894, a propor que, quando a intensidade da radiação emitida é máxima, o comprimento de onda associado obedece à expressão:

$$\lambda_{(máx.)}.T = 3 \times 10^3 \ (\mu m.K)$$

Em que $\lambda_{(máx.)}$ é o comprimento de onda do máximo da curva espectral, e T é a temperatura da fornalha para um determinado espectro. De acordo com essas informações, é **CORRETO** afirmar que a temperatura da fornalha é, aproximadamente,

A) 2 000 K e que $\lambda_{(máx.)}$ aumenta quando a temperatura aumenta.

B) 1 500 K e que $\lambda_{(máx.)}$ diminui quando a temperatura diminui.

C) 2 000 K e que $\lambda_{(máx.)}$ diminui quando a temperatura aumenta.

D) 1 500 K e que $\lambda_{(máx.)}$ aumenta quando a temperatura diminui.

03. (UFRS) "De acordo com a teoria formulada em 1900 pelo físico alemão Max Planck, a matéria emite ou absorve energia eletromagnética de maneira _______________ emitindo ou absorvendo ___________________, cuja energia é proporcional à _______________ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia."

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche **CORRETAMENTE** as lacunas.

A) Contínua – *quanta* – amplitude

B) Descontínua – prótons – frequência

C) Descontínua – fótons – frequência

D) Contínua – elétrons – intensidade

E) Contínua – nêutrons – amplitude

04. (UNESP–2006) Sabe-se que a energia de um fóton é proporcional à sua frequência. Também é conhecido experimentalmente que o comprimento de onda da luz vermelha é maior que o comprimento de onda da luz violeta que, por sua vez, é maior que o comprimento de onda dos raios X. Adotando a constância da velocidade da luz, pode-se afirmar que

A) a energia do fóton de luz vermelha é maior que a energia do fóton de luz violeta.

B) a energia do fóton de raio X é menor que a energia do fóton de luz violeta.

C) as energias são iguais, uma vez que as velocidades são iguais.

D) as energias dos fótons de luz vermelha e violeta são iguais, pois são parte do espectro visível, e são menores que a energia do fóton de raio X.

E) a energia do fóton de raio X é maior que a do fóton de luz violeta, que é maior que a energia do fóton de luz vermelha.

05. (CEFET-MG–2009) Em condições normais, o olho humano pode detectar 3 fótons de comprimento de onda igual a 6 600 Å. A energia, em joules, correspondente a esse número de fótons é igual a

Dados: $c = 3,0 \times 10^8$ m/s;

$h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s;

$1Å = 10^{-10}$ m.

A) 1×10^{-33}.

B) 3×10^{-19}.

C) 9×10^{-19}.

D) 3×10^{19}.

E) 9×10^{33}.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UNIVAS-MG–2008) Sobre as ondas eletromagnéticas representadas na figura, é **CORRETO** afirmar que

A) o comprimento de onda ultravioleta é maior do que o infravermelho.

B) a velocidade de propagação da luz visível é maior do que a das micro-ondas.

C) as ondas de TV possuem comprimento de onda maior do que a das ondas de rádio.

D) das ondas representadas, os raios cósmicos possuem maior velocidade no vácuo.

E) a energia do infravermelho é maior do que das ondas de TV.

02. (UFMG) As ondas eletromagnéticas, ao contrário das ondas mecânicas, não precisam de um meio material para se propagar. Considere as seguintes ondas: som, ultrassom, ondas de rádio, micro-ondas e luz. Sobre essas ondas é **CORRETO** afirmar que

A) luz e micro-ondas são ondas eletromagnéticas e as outras são ondas mecânicas.

B) luz é onda eletromagnética e as outras são ondas mecânicas.

C) som é onda mecânica e as outras são ondas eletromagnéticas.

D) som e ultrassom são ondas mecânicas e as outras são ondas eletromagnéticas.

03. (UEL-PR) Alguns semicondutores emissores de luz, mais conhecidos como LEDs, estão sendo introduzidos na sinalização de trânsito das principais cidades do mundo. Isto se deve ao tempo de vida muito maior e ao baixo consumo de energia elétrica dos LEDs em comparação com as lâmpadas incandescentes, que têm sido utilizadas para esse fim. A luz emitida por um semicondutor é proveniente de um processo físico, onde um elétron excitado para a banda de condução do semicondutor decai para a banda de valência, emitindo um fóton de energia $E = h\nu$. Nesta relação, h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz emitida ($\nu = c/\lambda$, onde c é a velocidade da luz e λ o seu comprimento de onda), e E equivale à diferença em energia entre o fundo da banda de condução e o topo da banda de valência, conhecida como energia de *gap* do semicondutor. Com base nessas informações e no conhecimento sobre o espectro eletromagnético, é **CORRETO** afirmar:

A) A energia de *gap* de um semicondutor será tanto maior quanto maior for o comprimento de onda da luz emitida por ele.

B) Para que um semicondutor emita luz verde, ele deve ter uma energia de *gap* maior que um semicondutor que emite luz vermelha.

C) O semicondutor que emite luz vermelha tem uma energia de *gap* cujo valor é intermediário às energias de *gap* dos semicondutores que emitem luz verde e amarela.

D) A energia de *gap* de um semicondutor será tanto menor quanto menor for o comprimento de onda da luz emitida por ele.

E) O semicondutor emissor de luz amarela tem energia de *gap* menor que o semicondutor emissor de luz vermelha.

04. (Unimontes-MG–2009) Considere as seguintes situações:

I. Elétrons de condução movimentam-se num fio condutor, no qual foi estabelecida uma corrente contínua de grande valor.

II. Elétrons em movimento circular uniforme, no interior de um acelerador de partículas.

III. Elétrons em movimento, a partir do repouso, numa região onde existe um campo elétrico uniforme, de grande intensidade.

Os elétrons estarão emitindo radiação eletromagnética nas situações descritas em

A) I e III, apenas.

B) I e II, apenas.

C) II e III, apenas.

D) I, II e III.

05. (PUC Minas–2009) O controle remoto de um aparelho de TV envia pulsos de radiação eletromagnética para um receptor na TV. Essa comunicação entre o controle remoto e o televisor ilustra que essa radiação

A) somente se propaga através do ar.

B) possui energia inversamente proporcional à sua frequência.

C) difrata e acelera no ar.

D) é uma onda eletromagnética.

06. (Unioeste-PR–2006) Sobre a Teoria Quântica, é **CORRETO** afirmar que

01. o termo *quanta* é sinônimo de *quark*, ambos representando subpartículas da estrutura do átomo.

02. a emissão ou absorção de radiação pelo átomo é realizada em "pacotes" de energia denominados *quanta*.

04. a energia dos *quanta* pode ser calculada por E = h.f, onde E é a energia, h é a constante de Planck e f é a frequência da radiação.

08. a quantização da energia tem origem nos trabalhos do físico alemão Max Planck, por volta do ano de 1900.

16. o *quantum* proposto por Planck confirmou a teoria clássica de que a energia é uma espécie de fluido, que passa continuamente de um átomo para outro durante as interações.

32. o *spin* e o *quantum* possuem conceitos semelhantes, ambos representando a rotação do elétron em torno de seu eixo.

64. com base na hipótese dos *quanta*, Albert Einstein elaborou, em 1905, uma nova teoria para a luz, considerando-a como um fluxo de corpúsculos chamados fótons.

Soma (   )

07. (EFOA-MG–2006) A energia de um fóton de uma onda eletromagnética de frequência f é dada pela equação E = hf, onde h é a constante de Planck. Sabe-se também que a capacidade de penetração de uma onda eletromagnética aumenta com a energia do fóton. O diagrama a seguir ilustra a localização relativa, no espectro eletromagnético, de algumas das radiações conhecidas.

Raios gama	Raios X	Ultra-violeta	Visível	Infra-vermelho	Micro-ondas	Ondas de rádio

Comprimento de Onda →

É **CORRETO** afirmar que

A) as ondas de rádio têm maior capacidade de penetração que os raios X porque possuem maior frequência.

B) os raios gama têm maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque possuem menor frequência.

C) a radiação visível tem menor capacidade de penetração que a radiação de micro-ondas porque possui menor frequência.

D) a radiação infravermelha tem menor capacidade de penetração que os raios X porque tem menor frequência.

E) a radiação visível tem maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque tem menor frequência.

08. (URCA-CE–2007) Sendo h = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s a constante de Planck e c = $3,00 \times 10^{8}$ m/s a velocidade da luz (no vácuo), então um *quantum* de raios X de comprimento de onda igual a $\lambda = 3,0 \times 10^{-10}$ m possui uma energia igual a

A) 2,0 J.

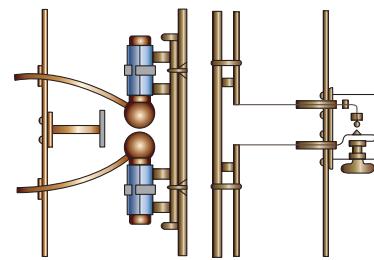
B) 3,3 J.

C) $6,63 \times 10^{-16}$ J.

D) 6,62 J.

E) 2,24 J.

09. (UFMG–2009) Um estudante de Física adquiriu duas fontes de luz *laser* com as seguintes especificações para a luz emitida:

	Fonte I	Fonte II
Potência	0,005 W	0,030 W
Comprimento de onda	632 nm	632 nm

Sabe-se que a fonte I emite N_I fótons por segundo, cada um com energia E_I e que a fonte II emite N_{II} fótons por segundo, cada um com energia E_{II}. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $N_I < N_{II}$ e $E_I = E_{II}$.

B) $N_I < N_{II}$ e $E_I < E_{II}$.

C) $N_I = N_{II}$ e $E_I < E_{II}$.

D) $N_I = N_{II}$ e $E_I = E_{II}$.

10. (Unioeste-PR–2007) A irradiação de alimentos é um processo de esterilização usado para melhorar a qualidade de frutas frescas, grãos e vegetais, prevenindo o brotamento, retardando a maturação e aumentando o tempo de conservação dos alimentos. Este processo consiste em submetê-los a pequenas doses de radiação, por um tempo determinado. As radiações comumente utilizadas são raios gama, raios X e feixe de elétrons. Sabe-se que a frequência da radiação gama é maior do que a frequência dos raios X. Sejam (V_G, E_G, L_G) e (V_X, E_X, L_X) as velocidades (V), as energias (E) e os comprimentos de onda (L) dos fótons da radiação gama e da radiação X, respectivamente, é **CORRETO** afirmar que

A) $V_X = V_G$; $E_X > E_G$; $L_X > L_G$.

B) $V_X = V_G$; $E_X < E_G$; $L_X > L_G$.

C) $V_X \neq V_G$; $E_X < E_G$; $L_X > L_G$.

D) $V_X \neq V_G$; $E_X < E_G$; $L_X < L_G$.

E) $V_X \neq V_G$; $E_X > E_G$; $L_X < L_G$.

11. (UFCG-PB–2006) Em 1z887, H. Hertz produziu, pela primeira vez em laboratório, ondas eletromagnéticas teoricamente previstas por Maxwell, em 1864. A figura a seguir mostra um desenho de parte do equipamento utilizado: o emissor e o receptor das ondas. Duas esferas metálicas eram ligadas a uma fonte de tensão variável, constituindo o emissor (à esquerda da figura). O dispositivo que permitia a detecção das ondas eletromagnéticas era constituído de uma pequena esfera, montada em frente a um parafuso pontiagudo pelo qual se podia ajustar a distância entre ela e sua ponta (à direita na figura).

Disponível em: <www.centroastronomico.com.br/boletim2004/05>.

Considerando o experimento realizado, pode-se afirmar que a(s)

A) cargas elétricas aceleradas entre as esferas do emissor produziam campos elétricos e magnéticos independentes do tempo que induziam correntes elétricas nos condutores do receptor, provocando uma descarga elétrica entre a pequena esfera e o parafuso.

B) ondas eletromagnéticas eram produzidas por uma corrente contínua entre as esferas do emissor.

C) corrente elétrica que se estabelecia, entre a pequena esfera e o parafuso do receptor, não variava com o tempo.

D) ondas eletromagnéticas produzidas pelas cargas aceleradas no emissor induziam correntes elétricas variáveis no receptor com as mesmas frequências com que foram emitidas.

E) ondas eletromagnéticas produzidas pelas cargas aceleradas no emissor induziam correntes elétricas variáveis no receptor, porém com frequências muito maiores com que foram emitidas.

12. (UFRGS) Os raios X são produzidos em tubos de vácuo, nos quais elétrons são submetidos a uma rápida desaceleração ao colidir contra um alvo metálico. Os raios X consistem em um feixe de

A) elétrons.

B) fótons.

C) prótons.

D) nêutrons.

E) pósitrons.

13. (UFMS–2007) A área médica faz grande uso das radiações ionizantes para tratamento de tumores. Dependendo da conduta de tratamento desses tumores, utilizam-se radiações de naturezas e energias diferentes como raios X e raios gama. Com relação a essas radiações, é **CORRETO** afirmar:

01. Os raios X podem ser produzidos por colisão de elétrons em um alvo.

02. A radiação gama é uma radiação eletromagnética proveniente do núcleo do átomo.

04. Os raios X são uma radiação eletromagnética proveniente das transições dos elétrons entre as camadas eletrônicas do átomo.

08. Os raios X são uma radiação eletromagnética menos energética que a radiação ultravioleta.

16. Os raios X são emitidos somente quando o núcleo do átomo que lhe deu origem estiver instável.

Soma (   )

14. (UFG–2006) Uma fonte luminosa puntiforme de 157 W emite luz de comprimento de onda 660 nm. A luz é emitida em todas as direções, formando frentes de onda esféricas com centro na fonte. **CALCULE** o número de fótons que atravessam, em 1 segundo, uma superfície de área igual a 1 cm^2, localizada a 1 metro da fonte.

Dados: $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J.s;

$c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s;

$\pi = 3{,}14$.

15. (UFMG / Adaptado) Em um tipo de tubo de raios X, elétrons acelerados por uma diferença de potencial de $2{,}0 \times 10^4$ V atingem um alvo de metal, onde são violentamente desacelerados. Ao atingir o metal, toda a energia cinética dos elétrons é transformada em raios X.

A) **CALCULE** a energia cinética que um elétron adquire ao ser acelerado pela diferença de potencial.

B) **CALCULE** o menor comprimento de onda possível ($\lambda_{mín}$) para os raios X produzidos por esse tubo.

C) **EXPLIQUE** por que ocorre emissão de raios X com comprimentos de ondas variáveis de $\lambda_{mín}$ até $\lambda \to \infty$.

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2010) Ao contrário dos rádios comuns (AM ou FM), em que uma única antena transmissora é capaz de alcançar toda a cidade, os celulares necessitam de várias antenas para cobrir um vasto território. No caso dos rádios FM, a frequência de transmissão está na faixa dos MHz (ondas de rádio), enquanto, para os celulares, a frequência está na casa dos GHz (micro-ondas). Quando comparado aos rádios comuns, o alcance de um celular é muito menor.

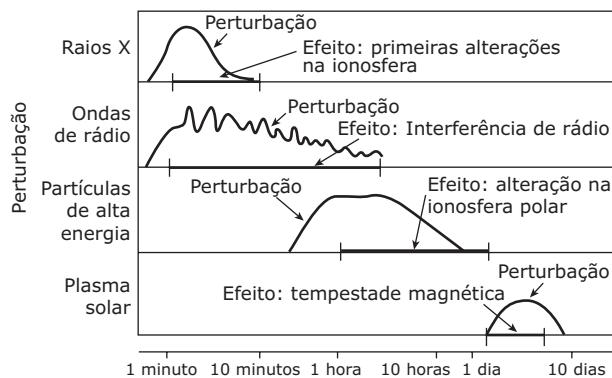
Considerando-se as informações do texto, o fator que possibilita essa diferença entre a propagação das ondas de rádio e as de micro-ondas é que as ondas de rádio são

A) facilmente absorvidas na camada da atmosfera superior conhecida como ionosfera.

B) capazes de contornar uma diversidade de obstáculos como árvores, edifícios e pequenas elevações.

C) mais refratadas pela atmosfera terrestre, que apresenta maior índice de refração para as ondas de rádio.

D) menos atenuadas por interferência, pois o número de aparelhos que utilizam ondas de rádio é menor.

E) constituídas por pequenos comprimentos de onda que lhes conferem um alto poder de penetração em materiais de baixa densidade.

02. (Enem–2009) O progresso da tecnologia introduziu diversos artefatos geradores de campos eletromagnéticos. Uma das mais empregadas invenções nessa área são os telefones celulares e *smartphones*. As tecnologias de transmissão de celular atualmente em uso no Brasil contemplam dois sistemas. O primeiro deles é operado entre as frequências de 800 MHz e 900 MHz e constitui os chamados sistemas TDMA/CDMA. Já a tecnologia GSM, ocupa a frequência de 1 800 MHz.

Considerando que a intensidade de transmissão e o nível de recepção "celular" sejam os mesmos para as tecnologias de transmissão TDMA/CDMA ou GSM, se um engenheiro tiver de escolher entre as duas tecnologias para obter a mesma cobertura, levando em consideração apenas o número de antenas em uma região, ele deverá escolher

A) a tecnologia GSM, pois é a que opera com ondas de maior comprimento de onda.

B) a tecnologia TDMA/CDMA, pois é a que apresenta efeito Doppler mais pronunciado.

C) a tecnologia GSM, pois é a que utiliza ondas que se propagam com maior velocidade.

D) qualquer uma das duas, pois as diferenças nas frequências são compensadas pelas diferenças nos comprimentos de onda.

E) qualquer uma das duas, pois nesse caso as intensidades decaem igualmente da mesma forma independentemente da frequência.

03. (Enem–2007) Explosões solares emitem radiações eletromagnéticas muito intensas e ejetam, para o espaço, partículas carregadas de alta energia, o que provoca efeitos danosos na Terra. O gráfico a seguir mostra o tempo transcorrido desde a primeira detecção de uma explosão solar até a chegada dos diferentes tipos de perturbação e seus respectivos efeitos na Terra.

Escala de tempo das pertubações solares e seus efeitos

Disponível em: <www.sec.noaa.gov> (Adaptação).

Considerando-se o gráfico, é correto afirmar que a perturbação por ondas de rádio geradas em uma explosão solar

A) dura mais que uma tempestade magnética.

B) chega à Terra dez dias antes do plasma solar.

C) chega à Terra depois da perturbação por raios X.

D) tem duração maior que a da perturbação por raios X.

E) tem duração semelhante à da chegada à Terra de partículas de alta energia.

GABARITO

Fixação

01. D
02. C
03. C
04. E
05. C

Propostos

01. E
02. D
03. B
04. C
05. D
06. Soma = 78
07. D
08. C
09. A
10. B
11. D
12. B
13. Soma = 3
14. $4{,}2 \times 10^{15}$ fótons
15. A) $3{,}2 \times 10^{-15}$ J

B) $6{,}2 \times 10^{-11}$ m (Caso em que o elétron perde toda sua energia na primeira colisão interna).

C) A maioria dos elétrons incidentes perde energia aos poucos, chegando ao repouso após múltiplas colisões. Em cada uma dessas colisões, a energia perdida corresponde a fótons de comprimentos de ondas específicos maiores que λ_{min}, já que a energia dissipada é menor que a energia total do elétron. Assim, como a energia dissipada pode assumir valores baixíssimos, os comprimentos de onda podem variar de λ_{min} até $\lambda \to \infty$.

Seção Enem

01. B 02. E 03. D

FÍSICA

Dualidade onda-partícula e efeito fotoelétrico

Max Planck, em 1900, explicou a distribuição de radiação eletromagnética emitida pelos corpos negros, supondo que os átomos desse corpo oscilassem apenas com determinados valores de energia, múltiplos de um valor elementar. Em outras palavras, a energia dos átomos seria quantizada. A princípio, o estudo de Planck despertou pouco interesse, até que, em 1905, analisando um fenômeno que ficou conhecido como efeito fotoelétrico, Albert Einstein percebeu que a própria radiação eletromagnética é quantizada. Em sua teoria, Einstein acolheu a ideia de que a luz possuía um comportamento dual, ora agindo como onda, ora como partícula. Assim, uma minúscula entidade desprovida de massa era a portadora da energia elementar da luz e de todas as outras radiações eletromagnéticas, tendo sido chamada de fóton. Em 1913, Niels Bohr usou o fóton para explicar os espectros descontínuos do gás hidrogênio. O que se assistiu nos anos seguintes foi a um espetacular avanço da Física Quântica e a uma compreensão, cada vez maior, do mundo atômico.

Neste módulo, estudaremos o efeito fotoelétrico, o comportamento dual da luz e os espectros descontínuos dos gases. Veremos que a teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico vai muito além da simples explicação desse fenômeno. Ao mostrar que a energia luminosa é quantizada, e que o fóton deve ser visto como uma onda-partícula, Einstein criou uma agenda de trabalho entre os físicos, que, paulatinamente, elucidaram e previram vários comportamentos dos átomos. A Física Quântica tornou-se a base para o estudo do núcleo atômico e das moléculas, proporcionando muitos avanços tecnológicos. O *laser*, os circuitos transistorizados e o microscópio eletrônico são apenas alguns dos incontáveis exemplos da inserção da Física Quântica entre nós.

A QUANTIZAÇÃO DA LUZ

O efeito fotoelétrico

Em 1887, Hertz descobriu o efeito fotoelétrico. Ele notou que a incidência de luz sobre um metal podia, sob certas circunstâncias, produzir a emissão de elétrons a partir dessa superfície. Em 1900, Lenard realizou uma série de experiências sobre o efeito fotoelétrico, usando o aparelho mostrado na figura 1. Observe que a luz incidente sobre a placa metálica A provoca a emissão de elétrons. Alguns atingem a placa oposta B, e uma corrente elétrica é registrada no galvanômetro G. O número de elétrons emitidos em A e que atingem B pode ser aumentado ou diminuído variando-se a diferença de potencial (V_{AB}) entre A e B. Isso é feito através do ajuste da posição do cursor sobre a resistência divisora de tensão do experimento.

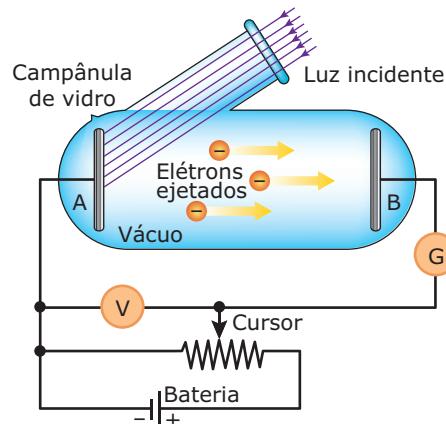



Figura 1: Montagem para estudar o efeito fotoelétrico.

A figura 2 mostra o gráfico da corrente elétrica I registrada no galvanômetro em função da tensão V_{AB}. Como a placa B é conectada ao circuito no lado do polo positivo da bateria, os elétrons emitidos em A são atraídos para B. Para valores de V_{AB} suficientemente elevados, todos os elétrons emitidos por A são coletados em B, e a corrente atinge um valor de saturação. Depois disso, um aumento extra em V_{AB} não afeta mais o valor da corrente, como pode ser observado no gráfico. Observe também que I_a é a corrente de saturação para uma luz de intensidade alta, enquanto I_b é a corrente de saturação para a luz (mesma frequência) de intensidade baixa.

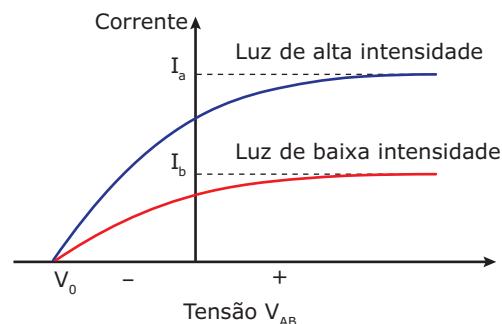



Figura 2: Voltagem aplicada entre a placa emissora A e a placa coletora B em função da corrente.

Se a polaridade da bateria for invertida (nesse caso, $V_{AB} < 0$), a placa B passará a repelir os elétrons emitidos por A. Observe que, para pequenos valores de V_{AB}, a corrente não cai imediatamente a zero, pois os elétrons são emitidos com certa energia cinética. Para valores mais elevados de V_{AB}, a corrente diminui, anulando-se quando $V_{AB} = V_0$, valor conhecido como potencial de corte ou de frenagem. Nesse ponto, a corrente é zero porque os elétrons de máxima energia cinética emitidos pela placa A atingem o repouso exatamente quando chegam à placa B. Pelo Princípio de Conservação da Energia, o valor dessa energia cinética pode ser calculado multiplicando-se o potencial V_0 pela carga do elétron (e). Assim, temos:

$$\left(\frac{1}{2}m.v^2\right)_{máx} = e.V_0$$

Alguns elétrons emitidos apresentam uma energia cinética um pouco menor que esse valor porque sofrem colisões internas ao tentar escapar do metal.

Observe novamente o gráfico (figura 2) e veja que o potencial de corte V_0 é o mesmo tanto para a luz de alta quanto para a luz de baixa intensidade. Isso significa, de acordo com a equação anterior, que a energia cinética máxima dos elétrons independe da intensidade da luz. Esse resultado é surpreendente. De acordo com a Física Clássica, o aumento na intensidade da luz deveria elevar a energia absorvida pelos elétrons, e isso deveria aumentar a energia cinética máxima dos elétrons emitidos.

A seguir, apresentamos as duas principais características do efeito fotoelétrico observadas por Lenard:

1. O aumento na intensidade da luz eleva a taxa de emissão de elétrons, mas a energia cinética destes permanece imutável.
2. Cada metal emite elétrons a partir de uma frequência mínima, além da qual o aumento da frequência da luz faz crescer a energia cinética dos elétrons.

Veremos, agora, a explicação dada por Einstein para o efeito fotoelétrico.

A interpretação quântica do efeito fotoelétrico

Em 1905, inspirado pela teoria de Planck, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico por meio da suposição de que a própria luz viajava no espaço concentrada em pacotes de energia, os fótons. Segundo Einstein, o fóton é uma partícula com massa zero, dotado de uma energia dada pela equação de Planck, E = h.f. Enquanto Planck pensava que a quantização da energia era restrita aos osciladores nas paredes do corpo negro, Einstein dizia que a quantização da energia era uma propriedade da luz. Portanto, a frequência **f** dos osciladores é também a frequência da própria luz emitida pelo corpo. Assim, como citado anteriormente, podemos substituir **f** pela razão entre a velocidade da luz **c** e o seu comprimento de onda **λ** e usar a seguinte equação para calcular a energia do fóton:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

A interpretação quântica do efeito fotoelétrico se ajustou a todas as características do fenômeno discutidas no último tópico. Vejamos como o conceito do fóton explica a independência da energia cinética dos elétrons em relação à intensidade da luz. De acordo com Einstein, um elétron ejetado de uma superfície metálica exposta à luz recebe a energia de um único fóton. Assim, quando o número de fótons incidentes sobre a placa aumenta, em um dado intervalo de tempo, o número de fótons que interage com os elétrons também cresce, e o número de elétrons ejetados aumenta. Porém, como cada fóton permanece com a mesma energia hf, cada elétron também continua recebendo essa mesma energia. É por isso que a energia cinética de ejeção (e o potencial de frenagem V_0) não depende da intensidade da luz. A figura 3 é uma visualização desse fato. Observe que a placa metálica é iluminada por luzes de mesma frequência, mas o feixe da esquerda tem menor intensidade que o feixe da direita. A luz mais intensa (note a maior aglomeração de fótons) gera uma maior taxa de emissão de elétrons. Observe, ainda, que os vetores velocidade dos elétrons são iguais nos dois casos.

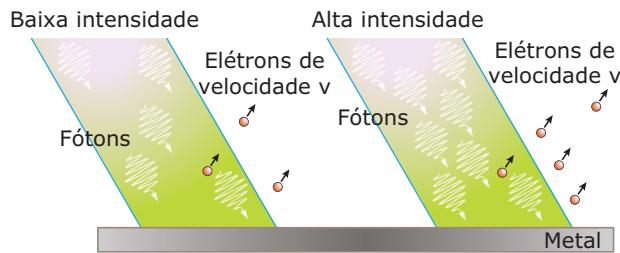



Figura 3: Elétrons de velocidades iguais, apesar de as luzes (de mesmas frequências) terem intensidades diferentes.

Agora, vamos discutir a dependência da energia cinética do elétron com a frequência da luz. Quando um fóton incide sobre uma superfície metálica, uma parcela da sua energia hf é usada para arrancar um elétron. Essa parcela depende do tipo de metal, e é chamada de trabalho de extração (ou função trabalho) **W**. O restante

(hf – W) é a energia cinética de ejeção do elétron (isso se ele não sofrer colisões internas). Por exemplo, quando uma luz amarela com fótons de energia E = hf = 2,2 eV incide sobre uma placa de césio (W = 1,8 eV), a energia cinética máxima de emissão de cada elétron vale 0,4 eV. Para uma frequência maior, digamos, luz azul com fótons de 2,5 eV, a energia cinética aumenta para 0,7 eV. Naturalmente, para cada metal existe uma frequência mínima, chamada de frequência de corte $\mathbf{f_0}$, em que a energia do fóton é exatamente igual ao trabalho de extração. Nesse caso, o fóton possui energia suficiente apenas para arrancar o elétron. Para o césio, a frequência de corte vale:

$$f_0 = \frac{W}{h} = \frac{1{,}8 . 1{,}6 \times 10^{-19}}{6{,}63 \times 10^{-34}} = 4{,}3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Essa é a frequência da luz vermelha no início do espectro visível. Metais alcalinos, como o césio, apresentam baixa eletronegatividade e pequenos valores de **W** e $\mathbf{f_0}$.

A dualidade onda-partícula

Após a publicação do trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico, experiências realizadas em laboratório confirmaram a teoria do fóton (veja o Exercício Resolvido 01). Além desse efeito, outros fenômenos de partículas foram explicados usando-se o conceito de fóton. Todavia, essa teoria parece entrar em conflito direto com a teoria ondulatória da luz, que também foi comprovada através de muitas experiências. A seguir, apresentamos uma breve discussão sobre essa questão.

Durante muitos anos, Isaac Newton e Christian Huygens protagonizaram um dos mais longos e empolgantes debates da história da Física. Newton defendia a ideia de que a luz era constituída por partículas (Teoria Corpuscular), enquanto Huygens acreditava que ela era um tipo de onda (Teoria Ondulatória). No início do século XIX, várias experiências com a luz mostravam que ela sofria interferência e outros fenômenos perfeitamente explicados do ponto de vista da Teoria Ondulatória. Na segunda metade do século XIX, Maxwell descobriu que a luz era uma onda eletromagnética. Diante de tantas evidências, a teoria ondulatória da luz passou a ser aceita por todos.

A interpretação de Einstein sobre o efeito fotoelétrico reacendeu, de certa forma, as ideias de Newton sobre o comportamento corpuscular da luz. Conforme discutimos no item anterior, a emissão de elétrons de uma superfície metálica exposta à luz é causada pela interação entre as partículas constituintes da luz (os fótons) e os elétrons da superfície. Embora o fóton seja uma partícula um tanto diferente daquela imaginada por Newton, o seu conceito conduz a uma Teoria Corpuscular para a luz. Atualmente, os físicos admitem um comportamento dual para a luz e para as outras ondas eletromagnéticas. Sob certas circunstâncias, a luz se comporta como uma onda (interferência, difração, etc.), sob outras, ela comporta-se como uma partícula (efeito fotoelétrico, emissão de radiação dos corpos negros, etc.). A figura 4 é interessante, pois ilustra o comportamento dual da luz em duas situações que ocorrem sucessivamente. Primeiro, um feixe de luz refrata e dispersa ao passar por um prisma (comportamento ondulatório). A seguir, o feixe monocromático selecionado produz a emissão de elétrons ao incidir sobre a placa metálica (comportamento corpuscular).

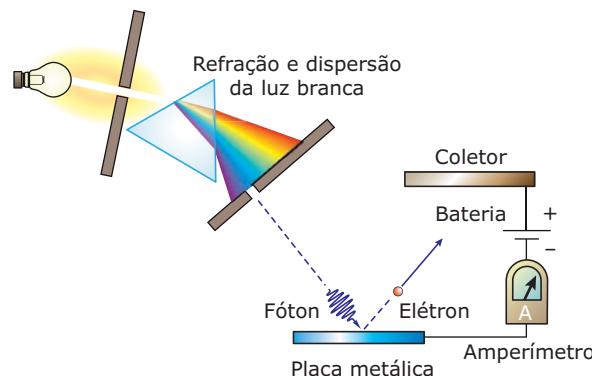



Figura 4: Comportamento ondulatório (dispersão) e corpuscular (efeito fotoelétrico) da luz, presentes nesse experimento.

A natureza é simétrica: existem as cargas positivas e as negativas, o frio e o quente, etc. Pensando assim, em 1924, o francês Louis de Broglie argumentou que, se a luz comporta-se ora como onda, ora como partícula, talvez o mesmo acontecesse com a matéria, em particular, com partículas como o elétron. Louis de Broglie previu que o comprimento de onda de uma partícula material é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{m.v}$$

Nessa expressão, **h** é a constante de Planck, **m** é a massa e **v** é a velocidade da partícula. Segundo essa teoria, um feixe de elétrons de baixa energia, cujo comprimento de onda obtido por essa equação é comparável ao comprimento de onda dos raios X, deveria sofrer difração perceptível ao atravessar a rede cristalina de um material de prova. Em 1928, os físicos americanos Davisson e Germer realizaram uma experiência que comprovou tal fato. Eles dirigiram um feixe de elétrons sobre um cristal de níquel e observaram que,

em vez de uma difusão geral (prevista pela teoria clássica), apareciam certas concentrações de elétrons, desviados ordenadamente (difratados) em direções definidas pelos planos do cristal. Além disso, essas direções variavam com a velocidade dos elétrons incidentes, conforme previa a teoria de de Broglie. A montagem e a foto mostradas na figura 5 ilustram a experiência para produzir a difração de elétrons.

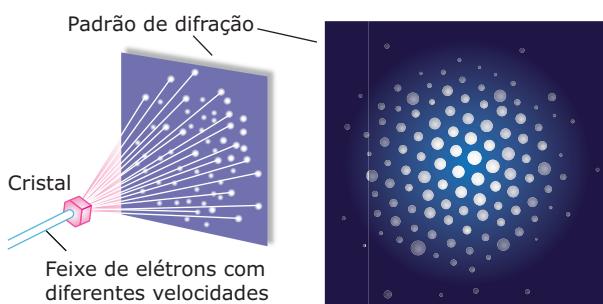
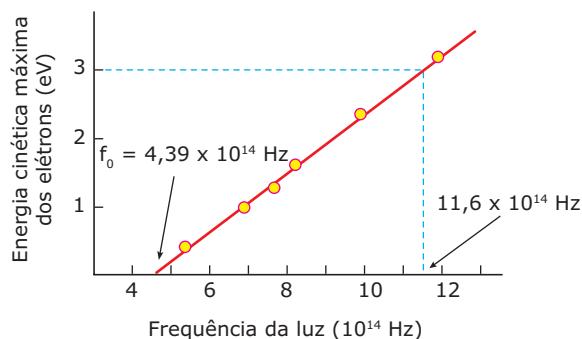



Figura 5: Montagem e imagem da difração de elétrons.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. O físico americano Robert Millikan realizou uma série de experiências para comprovar a teoria do fóton proposta por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico. Os resultados dos experimentos foram absolutamente concordantes com a teoria. O gráfico a seguir é baseado nos dados publicados por Millikan em 1916. Nele, a ordenada é a energia cinética máxima dos elétrons ejetados por uma placa metálica exposta a luzes de frequências diferentes, enquanto a abscissa representa as frequências dessas luzes.

A) Explicar por que esse gráfico é uma reta.

B) Explicar o significado físico da inclinação dessa reta e calcular o seu valor.

C) Explicar o significado físico da frequência f_0 indicada no gráfico.

D) Calcular o trabalho de extração da placa metálica.

Resolução:

A) De acordo com a teoria de Einstein, a energia cinética máxima de ejeção dos elétrons é igual à diferença entre a energia **E** que o fóton fornece ao elétron e o trabalho de extração **W** gasto em sua remoção. O valor da energia do fóton pode ser calculado por meio do produto entre a constante de Planck **h** e a frequência **f** da luz. Assim, a expressão da energia cinética máxima $E_{Cmáx}$ é:

$$E_{Cmáx} = h.f - W$$

Essa equação indica que a $E_{Cmáx}$ varia linearmente com **f**. Por isso, o gráfico da $E_{Cmáx}$ em função de **f** é uma reta.

B) De acordo com a equação utilizada no item anterior, o coeficiente angular da reta (inclinação) é a constante de Planck **h**. Usando alguns dados do gráfico, obtemos:

$$h = \frac{3}{(11,6 - 4,39) \times 10^{14}} = 4,2 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

Para converter **h** para a unidade **J.s**, basta multiplicar o valor anterior pelo fator 1,6 x 10^{-19} J/eV, e teremos: h = 6,7 x 10^{-34} J/s

C) O valor f_0 = 4,39 x 10^{14} Hz é a frequência de corte. Os fótons de luz com tal frequência apresentam energia suficiente apenas para remover os elétrons. Como não há excedente de energia, o elétron não é ejetado. Abaixo da frequência f_0, não há energia fotônica para remoção de elétrons.

D) De acordo com a equação obtida no item (A), o trabalho de extração **W** é o coeficiente linear da reta (valor da ordenada em que a reta corta o eixo vertical). Como o gráfico está interrompido entre a origem e a frequência de corte, a obtenção de **W** diretamente a partir do gráfico é mais difícil. Substituindo E_C = 0 e f = f_0 na equação da reta, podemos obter o valor de **W** mais facilmente. Assim:

$$0 = h.f_0 - W \Rightarrow W = 4,2 \times 10^{-15} . 4,39 \times 10^{14} = 1,8 \text{ eV}$$

A ESTRUTURA ATÔMICA

Espectros descontínuos dos gases

De acordo com o modelo de Planck para a radiação de corpo negro, sabe-se que os sólidos emitem radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda. Por isso, a radiação emitida por um sólido forma um espectro contínuo. Em contraste com os sólidos, os espectros de gases são descontínuos. Por exemplo, uma lâmpada de vapor de sódio emite uma luz amarela ao se produzir uma descarga elétrica nesse vapor. Assim, quando essa luz passa por um prisma, como mostrado na figura 6, ela produz uma única linha sobre o anteparo (se a fenda fosse mais estreita, a imagem no anteparo seria mais nítida, e observaríamos que esta é, na verdade, composta de duas linhas muito próximas).

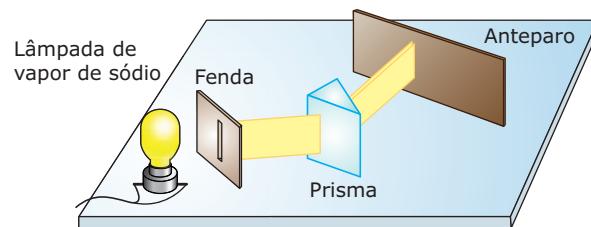



Figura 6: Espectro descontínuo do vapor de sódio.

Planck explicou com sucesso as curvas de radiação dos sólidos utilizando a revolucionária teoria da quantização. Na sequência, veremos como os físicos conseguiram explicar a radiação descontínua dos gases usando a ideia da quantização da energia.

A descoberta do elétron

Em 1897, Joseph John Thomson descobriu a existência do elétron, uma minúscula partícula dotada de carga elétrica negativa, presente em todo tipo de matéria. Por meio de um dispositivo muito engenhoso, Thomson conseguiu determinar o valor da razão entre a massa e a carga do elétron. A ideia de que a matéria é feita de átomos já era um consenso entre os cientistas. Além disso, era sabido que a matéria possuía dois tipos de carga elétrica, a positiva e a negativa, e que, em seu estado normal (neutro), a carga total da matéria é nula. Então, Thomson sugeriu que o átomo fosse uma esfera maciça de carga positiva, recheada de elétrons. A soma das cargas negativas dos elétrons anularia, dessa forma, a carga positiva da esfera. A figura 7 mostra um esquema do átomo de Thomson.

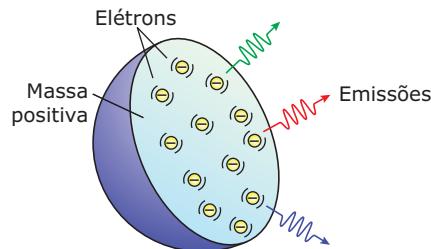



Figura 7: No modelo de Thomson, os elétrons incrustados na massa positiva vibram e emitem radiação.

Para explicar por que os gases emitem radiação eletromagnética com alguns comprimentos de ondas presentes no espectro e outros não, Thomson imaginou que cada elétron oscilasse em torno de sua posição de equilíbrio. Segundo o eletromagnetismo clássico, as cargas irradiam energia quando são aceleradas. Assim, admitindo que um elétron apresentasse uma frequência de oscilação própria, a energia proveniente dele produziria uma linha em uma determinada posição sobre o anteparo usado na produção do espectro do gás.

Na sequência, veremos que o átomo de Thomson mostrou-se falho com respeito à distribuição da carga positiva. Ainda assim, esse modelo tem o mérito de ser a primeira ideia sobre a arquitetura atômica.

O núcleo atômico

Em 1911, o físico neozelandês Ernest Rutherford (com a preciosa ajuda de dois estudantes, Marsden e Geiger) realizou uma experiência que revelou uma inconsistência no modelo de Thomson. Segundo esse modelo, a carga positiva do átomo acha-se diluída em toda extensão de sua massa. A carga negativa, representada pelos elétrons, também está diluída na esfera atômica. Então, Rutherford argumentou que, se essa teoria estivesse correta, uma fina lâmina metálica seria facilmente perfurada pelo bombardeio de partículas carregadas. Para confirmar suas ideias, Rutherford montou o aparato mostrado na figura 8, constituído por uma fonte de partículas α (carga positiva), uma fina lâmina de ouro e um detector sensível a impactos de partículas. Esse último é um invólucro revestido internamente com sulfeto de zinco, substância que apresenta fluorescência ao ser atingida por partículas de alta velocidade, como as partículas α do experimento.

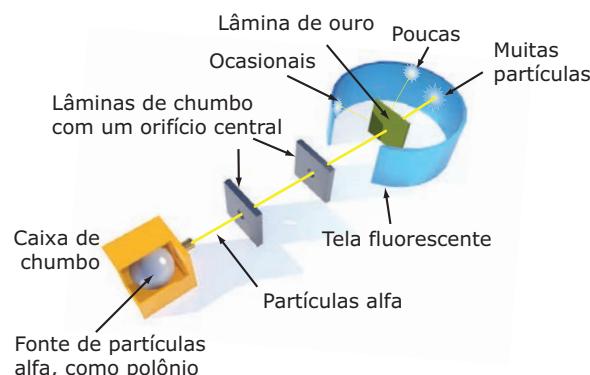



Figura 8: Experimento de Rutherford.

Como dissemos, caso o modelo de Thomson estivesse correto, seria esperado que as partículas α atravessassem a lâmina de ouro, seguindo a direção do feixe incidente (a carga negativa estaria uniformemente distribuida pelo átomo, ocorreriam apenas pequenos desvios das particulas α). Realmente, a maioria dos pontos cintilantes sobre o detector indicou essa trajetória. Porém, alguns pontos apareceram um pouco deslocados para os lados. De fato, para surpresa de Rutherford, apareceram pontos cintilantes em toda a extensão do detector. Ocasionalmente, alguns pontos cintilantes apareciam próximos à entrada do feixe, como mostra a figura. Consta que Rutherford disse: "É como se eu lançasse uma bala de canhão em uma folha de papel, e a recebesse de volta".

Diante das evidências, Rutherford sugeriu que a carga positiva do átomo deveria estar concentrada em uma região muito pequena, o núcleo atômico. Esse núcleo apresentaria uma gigantesca densidade de carga elétrica positiva, explicando os grandes (e ocasionais) desvios sofridos pelas partículas α. Ele sugeriu, ainda, que os elétrons estivessem girando em torno do núcleo, submetidos a uma força centrípeta de origem elétrica, como está ilustrado na figura 9.

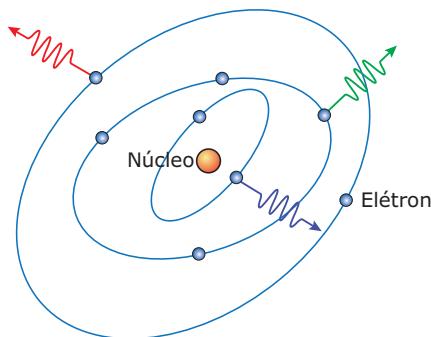



Figura 9: No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em círculos em torno de um núcleo positivo.

A emissão de radiação e os espectros descontínuos dos gases poderiam estar associados às acelerações centrípetas dos elétrons em órbita em torno do núcleo, como sugere a figura 9? De fato, não. A ideia dos elétrons irradiando energia eletromagnética é inconsistente, pois essa irradiação implicaria uma perda de energia. O elétron tenderia, portanto, a perder velocidade e a cair no núcleo. Para isso não ocorrer, isto é, para o elétron emitir energia e ainda assim manter uma órbita estável, ele precisaria receber um aporte externo de energia. Em átomos isolados, como é o caso da matéria ordinária, isso não acontece.

Embora o modelo de Rutherford não tenha se mostrado adequado para explicar a emissão de radiação pelos átomos, a descoberta do núcleo atômico foi um grande avanço na compreensão da estrutura da matéria. A seguir, veremos a interpretação quântica (e correta) dada por Bohr a respeito da emissão da radiação atômica.

O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio

Em 1913, Niels Bohr usou as ideias de Planck, Einstein e Rutherford para desenvolver um modelo atômico para o átomo de hidrogênio. Assim como ocorre com os osciladores de Planck, Bohr imaginou que o átomo de hidrogênio também possui certos estados estacionários de energia, nos quais ele não emite e nem absorve radiação eletromagnética. Para o átomo emitir ou absorver radiação, o elétron deve passar de um estado de energia (associado à sua órbita em torno do núcleo) para outro. O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio é baseado em três postulados. De acordo com o 1º Postulado, o átomo de hidrogênio emite um fóton quando o elétron passa de um estado de maior energia para outro de menor energia, e absorve um fóton quando o elétron passa de um estado de menor energia para outro de maior energia. A frequência do fóton emitido, ou absorvido, é dada por:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

Em que ΔE é a diferença de energia entre os dois estados e h é a constante de Planck.

De acordo com o 2º Postulado, o elétron gira em torno do núcleo em uma órbita circular, de modo que a força centrípeta que atua sobre ele é igual à força de atração elétrica exercida pelo núcleo:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{K_0 e^2}{r^2}$$

Na equação anterior, **m**, **e**, **v** e **r** são a massa, a carga, a velocidade e o raio orbital do elétron, respectivamente. A constante K_0, que vale 9,0 x 10^9 N/m^2C^2, é a constante eletrostática do vácuo.

O 3º Postulado introduz o caráter quântico ao átomo. Para quantizar a energia do elétron, Bohr percebeu que precisava quantizar os valores de r. Para isso, ele propôs esse postulado na seguinte forma:

$$mvr = n\frac{h}{2\pi} \qquad n = 1, 2, 3, ...$$

Nessa expressão, o produto mvr é denominado de momento angular do elétron. O fator n é o número quântico – número inteiro positivo associado às órbitas permitidas do elétron. O número quântico n = 1 está associado à órbita mais próxima do núcleo, n = 2 está associado à segunda órbita mais próxima do núcleo, e assim por diante. Combinando as duas expressões anteriores, Bohr chegou às expressões para calcular o raio orbital e a energia do elétron. A expressão para o raio orbital é:

$$r_n = 0{,}53n^2 \quad \text{(em angstron)}$$

O angstron é uma unidade adequada para medir distâncias atômicas (1 Å = 10^{-10} m). Na expressão anterior, fazendo n = 1, obtemos o raio da primeira órbita permitida, que é r_1 = 0,53 Å. Fazendo n = 2, obtemos o raio r_2 = 0,53.2^2 Å, fazendo n = 3, obtemos r_3 = 0,53.3^2 Å, e assim por diante. Note que, como r é proporcional a n^2, as órbitas externas são muito mais espaçadas do que as órbitas internas.

A energia total do elétron é composta de duas parcelas, uma associada ao movimento do elétron, que é a parcela relativa à energia cinética E_C, e a outra associada à posição do elétron, que é a parcela relativa à energia potencial elétrica E_P. Bohr mostrou que a energia cinética aumenta quando o elétron gira em órbitas mais próximas do núcleo, enquanto a energia potencial aumenta quando as órbitas são mais externas. Bohr também mostrou que a soma dessas energias é dada por:

$$E_C + E_P = E_n = -13{,}6\,\frac{1}{n^2} \qquad \text{(em elétron-volt)}$$

Ao contrário do raio atômico, as energias tornam-se cada vez mais próximas entre si à medida que o elétron passa para órbitas mais externas. Isso pode ser explicado matematicamente pela equação da energia, na qual o quadrado do número quântico aparece no denominador. Esse comportamento está ilustrado na figura 10, que é um diagrama dos níveis de energia do átomo de hidrogênio. Normalmente, o elétron ocupa o nível mais baixo de energia (estado fundamental), em que n = 1, r_1 = 0,53 Å e E_1 = −13,6 eV. A energia mais alta vale zero, correspondendo a n (e também r) $\rightarrow \infty$. Nesse caso, o elétron está desligado do átomo. Medições realizadas em laboratório indicam que a energia de ionização do átomo hidrogênio vale 13,6 eV, valor que concorda com a energia de ligação do elétron para n = 1.

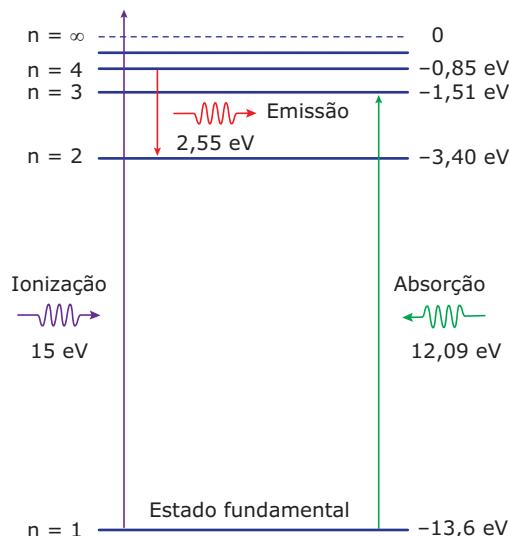



Figura 10: Níveis de energia do átomo de hidrogênio e os processos de emissão e absorção de radiação.

Para passar a um nível mais energético, o elétron deve absorver um fóton de energia exatamente igual à diferença entre a energia do nível de destino e aquela do nível de origem. Na figura 10, note que um fóton de 12,09 eV é absorvido pelo elétron, que passa do estado fundamental para o terceiro nível. Essa transição eletrônica foi possível porque a diferença entre as energias E_3 e E_1 também vale 12,09 eV (faça as contas para verificar esse valor). No estado 3, o elétron acha-se excitado. Por isso, a tendência é que ele retorne ao estado fundamental. O elétron pode fazê-lo saltando diretamente de volta para o nível 1, ou fazendo um primeiro salto para o nível 2, seguido de outro salto para o nível 1. Em cada uma dessas transições, a energia do elétron diminui, e um fóton de radiação é emitido. Um caso de emissão fotônica é mostrado na figura 10, em que um elétron excitado passa do nível 4 para o nível 2. Observe que o fóton emitido tem energia igual a 2,55 eV, que é exatamente a diferença entre as energias dos níveis 4 e 2.

Um elétron ligado ao átomo não pode absorver (ou emitir) fótons com qualquer valor de energia. Por exemplo, um elétron no estado fundamental é capaz de absorver um fóton de energia de 10,2 eV, mas não um fóton de 8 eV. No primeiro caso, a absorção é possível porque a energia do fóton somada à energia do elétron no estado fundamental resulta na energia do nível 2 (10,2 − 13,6 = −3,40 ev). Na outra situação, essa soma é −5,6 eV. Como não existe um nível estacionário com essa energia, o fóton de 8 eV passa pelo átomo de hidrogênio sem interagir com o elétron. Um caso diferente ocorre quando fótons com qualquer energia maior que 13,6 eV incidem sobre átomos de hidrogênio. Nesse caso, todos os fótons são absorvidos, e os elétrons são desligados de seus átomos. Como a energia necessária para remover o elétron é de apenas 13,6 eV, o restante da energia é usado para ejetar o elétron do átomo. A figura 10 mostra um fóton de energia 15 eV removendo um elétron do estado fundamental. Este é ejetado do átomo com a energia excedente de 1,4 eV. Fenômeno semelhante a esse ocorre no efeito fotoelétrico.

O porquê dos espectros descontínuos dos gases

O modelo de Bohr permitiu explicar quantitativamente os espectros descontínuos do hidrogênio. Embora esse modelo não possa ser aplicado para calcular as raias espectrais de outros gases, a ideia qualitativa de níveis quânticos de energia pode ser aplicada para todos os átomos e moléculas. Usando esse conceito, poderemos entender por que os espectros dos gases são descontínuos.

A figura 11 mostra três tipos de espectros. O primeiro é um espectro contínuo da luz emitida pelo filamento de uma lâmpada. Nesse caso, existem elétrons excitados em vários níveis de energia pertencentes a órbitas mais externas.

Além disso, nos sólidos, os átomos são próximos. Por isso, as transições eletrônicas ocorrem entre níveis de energia de um mesmo átomo, mas também entre níveis de átomos vizinhos. Dessa forma, os fótons emitidos apresentam uma infinidade de energias (e de frequências) e o espectro gerado é contínuo.

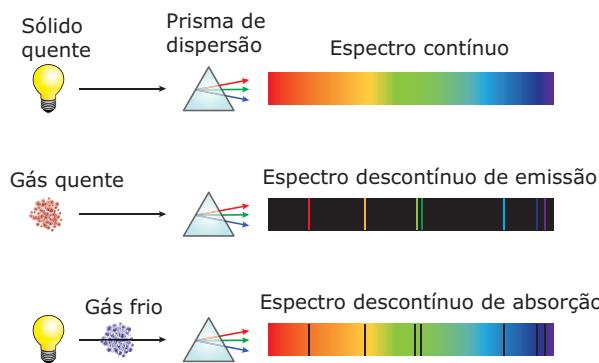



Figura 11: Espectro contínuo e espectros descontínuos de emissão e absorção.

O segundo espectro mostrado na figura 11 é um espectro descontínuo de emissão, gerado pela luz proveniente de um gás aquecido (ou submetido a uma descarga elétrica). Nesse caso, alguns elétrons acham-se excitados em níveis energéticos mais externos. Como os átomos dos gases são afastados uns dos outros, os elétrons excitados efetuam transições dentro de seu próprio átomo. As transições eletrônicas são limitadas, e os fótons emitidos apresentam certos valores de energia. Por isso, o espectro dessa radiação é descontínuo. As linhas que vemos no espectro foram produzidas pelas luzes constituídas por esses fótons.

O último espectro mostrado na figura 11 é um espectro de absorção. Uma lâmpada incide luz de todas as frequências sobre o mesmo tipo de gás usado no espectro de emissão. Fótons de determinadas frequências são absorvidos por elétrons que ocupam níveis mais internos de energia dos átomos do gás. Os demais fótons atravessam o gás e produzem um espectro em que faltam as luzes que foram absorvidas pelo gás. As linhas negras no espectro representam essas ausências. Note que as linhas sobre o espectro de emissão acham-se nas mesmas posições das linhas negras do espectro de absorção. O espectro de absorção é uma espécie de negativo do espectro de emissão.

Concluímos aqui a explanação sobre a Teoria Quântica. Aprendemos que os fenômenos atômicos, em geral, não podem ser descritos satisfatoriamente pela Física Clássica. Contudo, quando o número quântico é muito grande, a Física Quântica se reduz à Física Clássica. Esse fato é conhecido como o princípio da correspondência. O Exercício Resolvido 02, apresentado a seguir, aborda esse importante aspecto da Teoria Quântica. Antes de vê-lo, procure responder à seguinte pergunta:

PARA REFLETIR

O elemento hélio foi primeiro descoberto no Sol, e somente depois na Terra (*hélios*, em grego, quer dizer Sol). Você imagina como essa descoberta foi feita?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. De acordo com o Eletromagnetismo clássico, a frequência da luz emitida por um átomo é igual à frequência de rotação do elétron. A Física Quântica prevê que a frequência da luz emitida é a razão entre a diferença de energia dos níveis de transição e a constante de Planck. Calcular a frequência de rotação do elétron no átomo de hidrogênio para a segunda órbita (n = 2) e a frequência da luz emitida para uma transição do nível 2 para o nível 1 usando o modelo de Bohr. Repetir os cálculos para a centésima órbita (n = 100) e para a transição 100 → 99. Em cada caso, calcular o erro cometido ao se usar a Física Clássica e comentar os resultados.

Resolução:

Primeiro, vamos deduzir uma expressão para calcular a frequência f' de rotação do elétron em uma órbita circular de raio r. Ela pode ser obtida igualando-se a expressão da força centrípeta que atua sobre o elétron com a expressão da força elétrica, dada pela Lei de Coulomb, e substituindo-se a velocidade por $2\pi rf'$. Efetuando algumas manipulações, obtemos:

$$f' = \frac{e}{2\pi}\sqrt{\frac{K_0}{m.r^3}}$$

Substituindo o valor da carga elétrica, da massa do elétron ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C e $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg) e da constante eletrostática do vácuo $K_0 = 9,0 \times 10^9$ Nm²/C², obtemos:

$$f' = 2,53\sqrt{\frac{1}{r^3}}$$

O raio, em metros, é dado por $r = 0,53 \times 10^{-10}.n^2$. Para n = 2, temos $r = 2,12 \times 10^{-10}$ m. Utilizando esse valor, obtemos $f' = 8,2 \times 10^{14}$ Hz.

Agora, calcularemos a frequência da luz prevista pela Teoria Quântica (de Bohr) para a transição 2 → 1. Esse valor é dado por:

$$f = \frac{E_1 - E_2}{h} = \frac{13,6 - 3,40}{4,2 \times 10^{-15}} = 24 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Nessa equação, o numerador é a diferença entre os módulos das energias dos níveis 1 e 2 (fornecidas em eV na figura 10), e o denominador é a constante de Planck na unidade eV.s. O erro entre a frequência calculada classicamente ($8,2 \times 10^{14}$ Hz) e o valor anterior é grande (66%). Isso era esperado, pois os números quânticos 1 e 2 são pequenos, e a Física Clássica discorda da Física Quântica nessas situações.

Para n = 100, o raio é $r = 5\,300 \times 10^{-10}$ m. Esse raio atômico é muito grande, e a Física Clássica deve gerar resultados mais próximos da Física Quântica. Nesse caso, a frequência f' vale $6,6 \times 10^9$ Hz. Para obter a frequência quântica, precisamos usar $E = -13,6/n^2$ para calcular as energias dos níveis 100 e 99. Substituindo esses números na equação, encontramos:

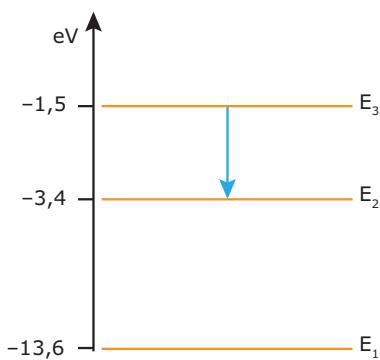
$$E_{100} = -1,36 \times 10^{-3} \text{ eV} \quad \text{e} \quad E_{99} = -1,39 \times 10^{-3} \text{ eV}$$

Calculando a diferença entre essas energias e dividindo-a pela constante de Planck, obtemos $f = 7,2 \times 10^9$ Hz para a luz emitida na transição 100 → 99. Como esperado, o erro de f' em relação a f tornou-se menor (8%). Para n = 10 mil, o raio atômico vale 2,3 mm. Nesse caso, o "átomo" é tão grande que a Física Clássica prevê com bastante precisão o seu comportamento.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFMS–2007) O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação de fótons (luz). Os elétrons emitidos possuem variadas energias, sendo os mais energéticos aqueles que estavam menos ligados ao material. Considerando um feixe de luz coerente (única frequência), incidindo sobre a superfície de um material, e que esteja produzindo o efeito fotoelétrico, é **CORRETO** afirmar:

01. A energia máxima com a qual os elétrons são emitidos não depende da frequência do feixe de luz incidente.
02. Quanto maior a intensidade do feixe de luz incidente, maior a taxa de emissão de elétrons.
04. A energia de um feixe de luz não depende do comprimento de onda da luz.
08. A emissão de elétrons é explicada pela teoria ondulatória da luz.
16. Os elétrons são emitidos porque absorvem energia dos fótons durante a colisão.

Soma (   )

02. (UFJF-MG–2010) Fótons de raios X, com energias da ordem de $1,98 \times 10^{-15}$ J, são utilizados em experimentos de difração com cristais. Nesses experimentos, o espaçamento entre átomos do cristal é da ordem do comprimento de onda dos raios X. Em 1924, Louis de Broglie apresentou a teoria de que a matéria possuía tanto características corpusculares como ondulatórias. A teoria de Louis de Broglie foi comprovada por um experimento de difração com cristais, utilizando-se um feixe de elétrons no lugar de um feixe de raios X. Considere a constante de Plack $h = 6,60 \times 10^{-34}$ J/s; a velocidade da luz no vácuo $c = 3,0 \times 10^8$ m/s; a massa do elétron $m = 9,10 \times 10^{-31}$ kg e 1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J.

A) **CALCULE** o valor do espaçamento entre os átomos do cristal, supondo que o valor do espaçamento é igual ao comprimento de onda dos raios X com energia de $1,98 \times 10^{-15}$ J.

B) **CALCULE** o valor da quantidade de movimento dos elétrons utilizados no experimento de difração com o cristal, cujo espaçamento entre os átomos foi determinado no item anterior. Despreze os efeitos relativísticos no movimento dos elétrons.

C) **CALCULE** o valor aproximado da energia cinética dos elétrons, em elétrons-volts, neste experimento.

03. (UFC–2007) No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a alternativa **CORRETA**.

A) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.

B) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.

C) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo encontra-se uniformemente distribuída em um volume esférico, ao passo que os elétrons estão localizados na superfície da esfera de carga positiva.

D) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo.

E) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização da energia.

04. (UFG–2006) Transições eletrônicas, em que fótons são absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio.

Na transição indicada ($E_3 \rightarrow E_2$), um fóton de energia

A) 1,9 eV é emitido.

B) 1,9 eV é absorvido.

C) 4,9 eV é emitido.

D) 4,9 eV é absorvido.

E) 3,4 eV é emitido.

05. (UFMG) O átomo de hidrogênio é composto por um próton e um elétron. No estado fundamental, a energia de ligação entre eles é de –13,60 eV. A energia de ligação do primeiro estado excitado é –3,40 eV, e a do segundo é –1,50 eV, conforme representado na figura A. Considere que o elétron esteja no segundo estado excitado. Para decair para o estado fundamental, ele emitirá fótons. A figura B representa linhas de espectro de emissão do átomo de hidrogênio, com os respectivos valores de energia indicados. Quais linhas podem aparecer nesse decaimento?

Figura A

Figura B

A) Somente as linhas com energia 12,10 eV, 10,20 eV e 1,90 eV

B) Somente a linha com energia 12,10 eV

C) Com exceção da linha de 12,75 eV, todas as demais

D) Somente a linha com energia 12,75 eV

E) Somente as linhas com energia 10,20 eV e 1,90 eV

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UDESC–2008) Foi determinado experimentalmente que, quando se incide luz sobre uma superfície metálica, essa superfície emite elétrons. Esse fenômeno é conhecido como efeito fotoelétrico e foi explicado em 1905 por Albert Einstein, que ganhou em 1921 o Prêmio Nobel de Física, em decorrência desse trabalho. Durante a realização dos experimentos desenvolvidos para compreender esse efeito, foi observado que

1. os elétrons eram emitidos imediatamente. Não havia atraso de tempo entre a incidência da luz e a emissão dos elétrons.
2. quando se aumentava a intensidade da luz incidente, o número de elétrons emitidos aumentava, mas não sua energia cinética.
3. a energia cinética do elétron emitido é dada pela equação $E_C = mv^2/2 = hf - W$, em que o termo hf é a energia cedida ao elétron pela luz, sendo h a constante de Planck e f a frequência da luz incidente. O termo W é a energia que o elétron tem de adquirir para poder sair do material, e é chamado função trabalho do metal.

Considere as seguintes afirmativas:

I. Os elétrons com energia cinética zero adquiriram energia suficiente para serem arrancados do metal.

II. Assim como a intensidade da luz incidente não influencia a energia dos elétrons emitidos, a frequência da luz incidente também não modifica a energia dos elétrons.

III. O metal precisa ser aquecido por um certo tempo, para que ocorra o efeito fotoelétrico.

Assinale a alternativa **CORRETA**.

A) Somente a afirmativa II é verdadeira.

B) Todas as afirmativas são verdadeiras.

C) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.

D) Somente a afirmativa III é verdadeira.

E) Somente a afirmativa I é verdadeira.

02. (UFRN–2008) Quando há incidência de radiação eletromagnética sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser arrancados dessa superfície e eventualmente produzir uma corrente elétrica. Esse fenômeno pode ser aplicado na construção de dispositivos eletrônicos, tais como os que servem para abrir e fechar portas automáticas. Ao interagir com a superfície metálica, a radiação eletromagnética incidente se comporta como

A) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito fotoelétrico.

B) partícula, e o fenômeno descrito é chamado de efeito fotoelétrico.

C) partícula, e o fenômeno descrito é chamado de efeito termiônico.

D) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito termiônico.

03. (UFPE–2007) O efeito fotoelétrico, explicado por Albert Einstein em 1905, constitui um dos marcos iniciais no desenvolvimento da Física Quântica. Assinale, dentre as alternativas a seguir, a **ÚNICA** característica observada no efeito fotoelétrico que está de acordo com a previsão da Física Clássica, quando fotoelétrons são emitidos a partir do cátodo.

A) A existência de uma frequência de corte da radiação incidente.

B) O crescimento da corrente fotoelétrica com a frequência da radiação incidente.

C) A ausência de intervalo de tempo apreciável entre a incidência de radiação no cátodo e o estabelecimento da corrente fotoelétrica.

D) O crescimento da corrente fotoelétrica com a intensidade da radiação incidente.

E) A dependência da energia cinética dos fotoelétrons com a frequência da radiação incidente.

04. (UDESC–2006) Uma radiação ultravioleta, de comprimento de onda igual a $2,50 \times 10^{-7}$ m, incide na superfície de um metal, fazendo com que sejam ejetados elétrons dessa superfície. Sendo a energia cinética máxima desses elétrons igual a 0,800 eV, qual o valor da função trabalho desse metal?

Constante de Planck = $6,4 \times 10^{-34}$ J.s = $4,0 \times 10^{-15}$ eV.s

A) 6,50 eV

B) 5,60 eV

C) 4,80 eV

D) 4,00 eV

E) 3,50 eV

05. (UFG–2006) Levando em conta a dualidade onda-partícula da luz, qual dos fenômenos a seguir caracteriza a sua natureza corpuscular?

A) A polarização da luz ao atravessar um polaroide.

B) A difração da luz ao atravessar uma fenda estreita.

C) O efeito fotoelétrico da luz ao incidir em uma superfície metálica.

D) A interferência da luz após passar por fendas paralelas e estreitas.

E) O deslocamento para o vermelho do espectro óptico das estrelas distantes.

06. (Unifor-CE–2007) Um elétron, no primeiro estado quântico do átomo de hidrogênio, possui velocidade igual a $2,0 \times 10^{6}$ m/s. A massa do elétron é $9,1 \times 10^{-31}$ kg, e a constante de Planck é $6,6 \times 10^{-34}$ J.s. O comprimento de onda de de Broglie desse elétron, em metros, vale

A) 2×10^{-59}.

B) $2,4 \times 10^{-16}$.

C) $3,6 \times 10^{-10}$.

D) $2,4 \times 10^{-8}$.

E) $1,2 \times 10^{-6}$.

07. (UEL-PR–2007) Atualmente, sabe-se que as partículas que compõem a matéria formadora do Universo podem ter comportamentos de natureza tanto corpuscular como ondulatória. O fato de não observarmos diretamente a natureza ondulatória em objetos materiais macroscópicos, como em uma bola de bilhar de aproximadamente 50 g, possuindo velocidade igual a 5,0 m/s, deve-se

Dado: h = $6,63 \times 10^{-34}$ J.s = $4,14 \times 10^{-15}$ eV.s.

A) à razão de não ter sido inventado um aparelho óptico que identifique diretamente essa característica da matéria.

B) ao fato de o comprimento de onda associado, que tem o valor de $2,65 \times 10^{-33}$ m, ser pequeno para uma detecção, mesmo com aparelhos de medida que alcancem a ordem de grandeza no nível subatômico.

C) à massa da bola, pois tem um valor muito grande para ser possível a demonstração do caráter ondulatório.

D) a uma falha dos postulados de Louis de Broglie e na experiência de Davisson-Germer na medida de comprimento de onda da bola de bilhar.

E) aos centros difratores (orifícios, fendas ou átomos) utilizados para medir a frequência da onda associada à bola, de valor $1,89 \times 10^{33}$ Hz, estarem localizados incorretamente nos equipamentos de detecção.

08. (UFT–2007) Em um átomo, o primeiro nível, ocupado por um elétron, tem energia $E_1 = -2,6 \times 10^{-19}$ J e o segundo, desocupado, tem energia $E_2 = -1,3 \times 10^{-19}$ J. Ao ser iluminado com luz monocromática, de determinada frequência, esse átomo absorve um fóton e, com isso, o elétron passa do primeiro nível para o segundo. Sabe-se que a constante de Planck é de $6,6 \times 10^{-34}$ J.s. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que, na situação descrita, a frequência da luz incidente no átomo é de, aproximadamente,

A) 1×10^{14} s^{-1}.

B) 2×10^{14} s^{-1}.

C) 3×10^{14} s^{-1}.

D) 4×10^{14} s^{-1}.

09. (UFRN–2008) No início do século XX, foram propostos dois modelos atômicos da matéria segundo os quais o átomo era constituído de um pequeno núcleo formado por cargas positivas e, em torno desse núcleo, orbitavam os elétrons. O modelo de Rutherford (1911) baseava-se em experimentos de espalhamento de partículas alfa desviadas pelos núcleos atômicos, enquanto o modelo de Bohr (1913), que procurava superar as limitações do modelo anterior, explicava o espectro de linhas de emissão do átomo de hidrogênio supondo que os elétrons podiam realizar transições entre as órbitas eletrônicas.

Em relação a um dos modelos anteriormente citados, pode-se afirmar também:

A) O modelo de Bohr explicava a estabilidade das órbitas eletrônicas do átomo a partir da quantização do momento angular.

B) O modelo de Bohr mostrava a instabilidade das órbitas eletrônicas do átomo a partir dos experimentos de espalhamento de partículas alfa.

C) O modelo de Rutherford explicava a instabilidade das órbitas eletrônicas do átomo a partir da quantização da energia.

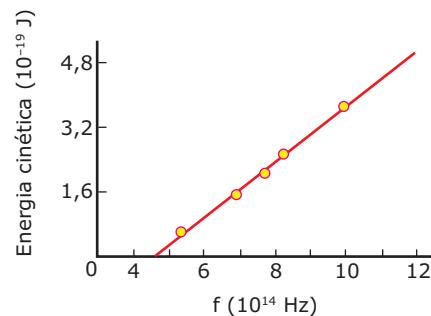
D) O modelo de Rutherford mostrava a estabilidade das órbitas eletrônicas do átomo a partir de experimentos de espalhamento de partículas alfa.

10. (Unimontes-MG–2007) Em 1913, apenas dois anos após o físico inglês Ernest Rutherford ter mostrado que o átomo possuía um núcleo, o grande físico dinamarquês Niels Bohr propôs um modelo para o átomo de hidrogênio que não apenas levava em conta a existência das linhas espectrais, mas predizia seus comprimentos de onda com uma precisão em torno de 0,02%. Os postulados que Bohr introduziu para seu modelo são:

1. Um átomo pode existir, sem irradiar energia, em qualquer um de um conjunto discreto de estados de energia estacionários;

2. Um átomo pode emitir ou absorver radiação apenas durante transições entre esses estados estacionários. A frequência da radiação e, consequentemente, da linha espectral correspondente é dada por $h.f_{if} = E_i - E_f$ (h é a constante de Planck, cujo valor é $4,14 \times 10^{-15}$ eV.s).

Um átomo absorve um fóton de frequência $6,2 \times 10^{14}$ Hz. Com base no modelo de Bohr, a energia do átomo aumenta de, aproximadamente,

A) 6,0 eV.
B) 5,2 eV.
C) 4,1 eV.
D) 2,6 eV.

11. (Unioeste-PR–2006) Existem vários modelos para explicar o comportamento dos átomos. O modelo de Bohr é o mais simples para explicar algumas propriedades do átomo de hidrogênio. No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio, um elétron (q = −e) circunda um próton (q = +e) em uma órbita de raio R. Qual a velocidade do elétron nessa órbita? Considere K como a constante da Lei de Coulomb e m a massa do elétron.

A) $2e\sqrt{\frac{K}{mR}}$

B) $e\sqrt{\frac{2K}{mR}}$

C) $e\sqrt{\frac{K}{mR}}$

D) $\frac{eK}{\sqrt{mR}}$

E) $\frac{e\sqrt{K}}{mR}$

12. (UEM-PR–2007) A respeito do raio *laser*, assinale a alternativa **CORRETA**.

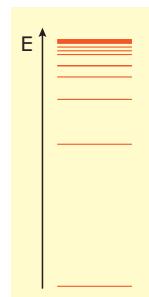
A) É obtido pela desintegração do núcleo da substância radioativa que é utilizada na fabricação do *laser*.

B) A luz do *laser* é praticamente policromática, pois é constituída de radiações que apresentam várias frequências.

C) É uma onda eletromagnética que corresponde às mais altas frequências na faixa dos raios X.

D) A luz do Sol é um *laser*.

E) É uma amplificação da luz por emissão estimulada de radiação.

13. (UFMG–2007) No efeito fotoelétrico, um fóton de energia E_f é absorvido por um elétron da superfície de um metal. Sabe-se que uma parte da energia do fóton, E_m, é utilizada para remover o elétron da superfície do metal e que a parte restante, E_c, corresponde à energia cinética adquirida pelo elétron, ou seja, $E_f = E_m + E_c$. Em 1916, Millikan mediu a energia cinética dos elétrons que são ejetados quando uma superfície de sódio metálico é iluminada com luz de diferentes frequências. Os resultados obtidos por ele estão mostrados no gráfico.

Considerando essas informações,

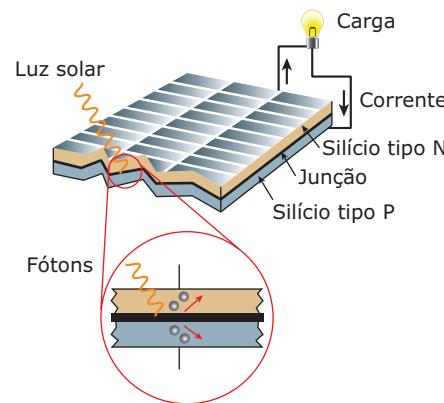
A) **CALCULE** a energia mínima necessária para se remover um elétron de uma superfície de sódio metálico. **JUSTIFIQUE** sua resposta.

B) **EXPLIQUE** o que acontece quando uma luz de comprimento de onda de $0{,}75 \times 10^{-6}$ m incide sobre a superfície de sódio metálico.

14. (UFMG–2009)

A) No modelo de Niels Bohr para o átomo de hidrogênio, um elétron gira em torno de um próton, em órbitas circulares, sob a ação de uma força atrativa. Nesse caso, somente certos valores de raios de órbita são permitidos. Sejam m a massa e q o módulo da carga do elétron. Com base nas leis da Mecânica Clássica e da Eletrostática, bem como considerando as grandezas mencionadas e as constantes físicas necessárias, **DETERMINE** a velocidade do elétron quando este se encontra em uma órbita de raio R no átomo de hidrogênio.

B) Posteriormente à formulação do modelo de Bohr, Louis de Broglie propõe que elétrons, assim como outras partículas, têm propriedades ondulatórias e, também, que o comprimento de onda λ associado a uma partícula em movimento é dado por $\lambda = h/p$, em que h é a constante de Planck e p é a quantidade de movimento (momento linear) do elétron. As órbitas de raios quantizados do modelo de Bohr podem ser explicadas com base na consideração de que o perímetro de uma órbita permitida deve conter um número inteiro N de comprimentos de onda da onda associada ao elétron. Considerando essas informações, **DETERMINE** os raios permitidos para as órbitas de Bohr em termos de N, m, e q e, também, das constantes físicas necessárias.

15. (UFMG–2010) O espectro de emissão de luz do átomo de hidrogênio é discreto, ou seja, são emitidas apenas ondas eletromagnéticas de determinadas frequências, que, por sua vez, fornecem informações sobre os níveis de energia desse átomo.

Na figura anterior, está representado o diagrama de níveis de energia do átomo de hidrogênio.

1. No século XIX, já se sabia que cada frequência do espectro de emissão do hidrogênio é igual à soma ou à diferença de duas outras frequências desse espectro. **EXPLIQUE** por que isso ocorre.

2. Sabe-se que o espectro do átomo de hidrogênio contém as frequências $2{,}7 \times 10^{14}$ Hz e $4{,}6 \times 10^{14}$ Hz. A partir desses dados, **DETERMINE** outra frequência desse espectro que corresponde a uma luz emitida na região do visível.

SEÇÃO ENEM

01. As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, como o silício, que apresentam características intermediárias entre os condutores e os isolantes. No escuro, o selênio é isolante. Em seu estado cristalino puro, o silício é um condutor medíocre. No entanto, acrescentando um pouco de fósforo ao silício, obtém-se um ótimo condutor com elétrons livres, ou seja, com portadores de cargas livres negativas. Por isso, esse processo é chamado de dopagem tipo N. Na dopagem com boro, obtém-se também um ótimo condutor, mas com portadores de cargas livres positivas (a ausência de elétrons na faixa de condução do cristal, lacunas, podem ser consideradas como cargas positivas livres). Daí, o nome dopagem tipo P. Uma célula fotovoltaica é formada de uma camada de material tipo N e outra de material tipo P, conforme mostra a figura a seguir. Um campo elétrico é formado devido à diferença de potencial existente na junção P-N. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, fótons de certos comprimentos de onda arrancam elétrons das duas camadas, transformando-as em condutoras de eletricidade. Por isso, uma lâmpada conectada entre as duas camadas permanecerá acesa enquanto a célula receber luz.

De acordo com as informações do texto, e usando conhecimentos básicos sobre o efeito fotoelétrico, pode-se concluir que a célula fotovaltaica é um dispoditivo

A) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente depende tanto da intensidade da luz quanto das frequências presentes na luz.

B) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente depende da intensidade da luz, mas independe das frequências presentes na luz.

C) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente independe da intensidade da luz como também das frequências presentes na luz.

D) que não armazena energia elétrica, ela apenas mantém uma corrente elétrica enquanto estiver exposta à luz, e o valor dessa corrente depende tanto da intensidade da luz quanto das frequências presentes na luz.

E) que não armazena energia elétrica, ela apenas mantém uma corrente elétrica enquanto estiver exposta à luz, e o valor dessa corrente depende da intensidade da luz, mas independe das frequências presentes na luz.

02. Há exatos 100 anos, o físico Ernest Rutherford faria um anúncio que mudaria para sempre os rumos da ciência: o átomo tem uma região central, o núcleo, onde toda a sua carga positiva e praticamente toda sua massa está concentrada. Para descobrir isso, Rutherford lançou partículas alfa (dupla carga positiva) contra uma finíssima lâmina de ouro. Para perplexidade, Rutherford notou que algumas partículas eram desviadas e umas eram até mesmo ricocheteadas de volta. Ao final de 1910, Rutherford entendeu que o ricocheteio dessas partículas era o resultado de uma única interação (colisão) entre a partícula alfa e a carga positiva do núcleo atômico. Nesse novo modelo atômico, os elétrons orbitavam o núcleo, como um sistema planetário, em uma região esférica de raio comparável ao tamanho do átomo. No experimento de Rutherford, a chance de uma partícula alfa passar nas proximidades de um núcleo e sofrer desvio era bem pequena. Mais rara ainda, seria uma aproximação quase de frente contra o núcleo, com a consequente deflexão da partícula alfa em sentido contrário. Rutherford registrou um único desvio para trás em cada 20 mil partículas alfas lançadas contra o alvo.

CIÊNCIA HOJE. fev. 2011 (Adaptação).

De acordo com o seu experimento, Rutherford pôde concluir que o tamanho do núcleo atômico era

A) muito grande, pois algumas partículas alfas incidentes foram refletidas pela lâmina de ouro.

B) muito grande, pois algumas partículas alfas foram desviadas pela lâmina de ouro.

E) igual ao próprio tamanho do átomo, pois a massa nuclear é praticamente igual à massa atômica.

D) ínfimo, pois pouquíssimas partículas alfas incidentes foram refletidas de volta pela lâmina de ouro.

E) ínfimo, pois muitas partículas alfas incidentes foram refletidas de volta pela lâmina de ouro.

GABARITO

Fixação

01. Soma = 18

02. A) $1{,}0 \times 10^{-10}$ m

B) $6{,}6 \times 10^{-24}$ kg.m/s

C) $1{,}5 \times 10^{2}$ eV

03. D 04. A 05. A

Propostos

01. E	04. D	07. B	10. D
02. B	05. C	08. B	11. C
03. D	06. C	09. A	12. E

13. A) $E = 3{,}0 \times 10^{-19}$ J. Usando os valores $E_C = 1{,}6 \times 10^{-19}$ J, $f = 7 \times 10^{14}$ Hz e a equação $h.f = E_C + W$, encontramos o valor pedido.

B) Não há emissão de elétrons na placa, pois a radiação com esse comprimento de onda corresponde a uma frequência de $4{,}0 \times 10^{14}$ Hz, valor inferior à frequência de corte $f_0 \approx 4{,}6 \times 10^{14}$ Hz, correspondente à energia mínima para arrancar elétrons da placa. A luz é absorvida pela placa, que se aquece.

14. A) $v = q.\sqrt{\dfrac{K}{m.R}}$

B) $R = N^2 \dfrac{h^2}{4\pi^2 K m q^2}$

15. 1. Considere três níveis de energia de valores E_m, E_m e E_p. Considere as três transições de um elétron: do nível p ao m, do m ao n e do p ao n. De acordo com o modelo de Bohr, as frequências dos fótons emitidos são $f_{pm} = (E_p - E_m)/h$, $f_{mn} = (E_m - E_n)/h$ e $f_{pn} = (E_p - E_n)/h$, sendo h a constante de Planck. Comparando essas expressões, percebemos que $f_{pn} = f_{pm} + f_{mn}$, ou que $f_{pm} = f_{pn} - f_{mn}$, ou ainda que $f_{mn} = f_{pn} - f_{pm}$. Portanto, a frequência devida a uma dessas transições é igual à soma das outras duas frequências ou igual à diferença entre elas.

2. $7{,}3 \times 10^{14}$ Hz

Seção enem

01. D

02. D

FÍSICA

Introdução à Relatividade Especial

MÓDULO 18 FRENTE D

Iniciaremos o módulo apresentando os postulados da Teoria da Relatividade Especial e suas consequências, como a dilatação do tempo e a contração do espaço. Discutiremos, em seguida, a conversão entre massa e energia. Na parte final do módulo, abordaremos os seguintes fenômenos nucleares: os decaimentos radioativos de certos núcleos atômicos e as reações de fusão e fissão nuclear.

A TEORIA DA RELATIVIDADE

Os postulados da Teoria da Relatividade Restrita

Um sistema de referência inercial é aquele que não possui aceleração, ou seja, ou encontra-se parado ou em movimento retilíneo uniforme. Assim, a Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial) permite relacionar medidas de tempo e de espaço entre dois sistemas inerciais, isto é, sistemas de referência que se deslocam em movimento retilíneo uniforme um em relação ao outro. A Teoria da Relatividade Restrita é sustentada pelos seguintes postulados:

> Postulado 1: As leis da Mecânica e do Eletromagnetismo são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

> Postulado 2: A velocidade da luz é absoluta (constante), independentemente do referencial inercial de observação.

O 1º Postulado é o princípio da relatividade newtoniana estendido às leis do Eletromagnetismo. Assim, um passageiro dentro de um trem silencioso e sem janelas, que viaja em movimento retilíneo uniforme com velocidade v em relação aos trilhos, não é capaz de detectar o movimento do trem (distinguir se ele está parado ou em movimento retilíneo uniforme) por meio de aparatos mecânicos, como também não pode fazê-lo por meio de medições envolvendo ímãs, fios transportando corrente elétrica ou pulsos de luz.

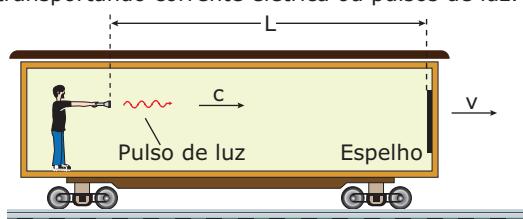



Figura 1: Experiência para constatar o movimento do trem.

O 2º Postulado é uma imposição para que o 1º Postulado seja respeitado. Como a velocidade da luz não depende do referencial inercial, a velocidade do pulso luminoso na figura 1 é igual a **c** tanto no movimento de ida quanto no movimento de retorno do pulso. Por isso, o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso vale $\Delta t = 2L/c$, tanto para o trem parado quanto para o trem em movimento uniforme. Experiências com o pulso de luz, assim como outras experiências de eletromagnetismo, não permitem saber se o referencial está ou não em movimento.

A invariância da velocidade da luz é verificada em todos os referenciais inerciais e em todas as direções. Isso pode parecer surpreendente, mas medidas feitas com instrumentos modernos e extremamente precisos confirmam esse resultado. A seguir, apresentaremos várias consequências dos postulados de Einstein. São essas implicações que constituem, de fato, a Teoria da Relatividade Restrita.

Simultaneidade

Quando dois eventos ocorrem no mesmo instante de tempo, dizemos que eles são simultâneos. De acordo com a Teoria da Relatividade:

> Dois eventos simultâneos em um referencial inercial não são necessariamente simultâneos em outro referencial inercial que se move em relação ao primeiro.

Einstein explicou essa ideia por meio do exemplo ilustrado na figura 2. Dois raios de luz A e B são produzidos em locais equidistantes do observador inercial X na Terra e também equidistantes de um observador inercial Y no trem, que se move com velocidade constante em direção a B. Os clarões são percebidos simultaneamente pelo observador X, que conclui, corretamente, que os aparecimentos dos clarões são eventos simultâneos. Agora, considere o observador Y no trem. Para esse observador, de acordo com o 2º Postulado da Relatividade, tanto o clarão B quanto o clarão A se aproximam dele com a mesma velocidade **c**. Porém, como o trem se aproxima de B, ele percebe o clarão B primeiro, e só depois o clarão A. Portanto, para o observador no trem, os aparecimentos dos clarões não são eventos simultâneos. Se a velocidade do trem fosse comparável à velocidade da luz (por exemplo, 60% de c), o observador Y veria o clarão B e, a seguir, poderia voltar calmamente o seu olhar para trás, esperar um pouco, e, só depois, perceberia o clarão A chegando até ele.

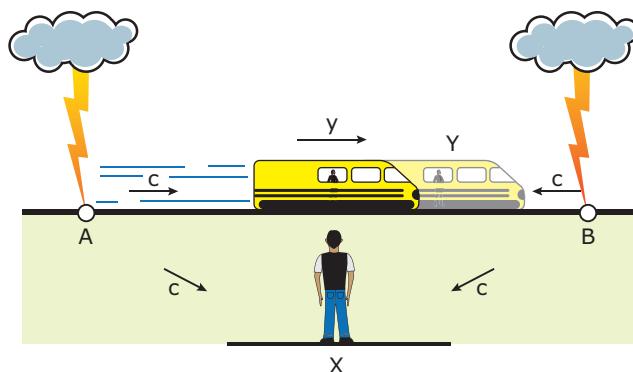



Figura 2: Exemplo proposto por Einstein para explicar a simultaneidade e a não simultaneidade.

Dilatação do tempo

Outra importante consequência do 2º Postulado de Einstein nos conduz ao relativismo do tempo. Para entender esse conceito, vamos considerar os referenciais inerciais S e S'. O primeiro referencial é a Terra, e o segundo é uma nave que viaja com uma velocidade constante v em relação à Terra. Dentro da nave, um astronauta dispara um pulso de luz em direção a um espelho plano fixo no teto. O astronauta registra um intervalo de tempo $\Delta t'$ no caminho vertical de ida e volta, entre a emissão do pulso e o seu retorno após sofrer reflexão no espelho. Ana Lúcia, uma observadora inercial na Terra, vê o mesmo pulso percorrer um caminho mais longo (na diagonal), registrando um intervalo de tempo entre a saída e o retorno do pulso igual a Δt, como mostra a figura 3.

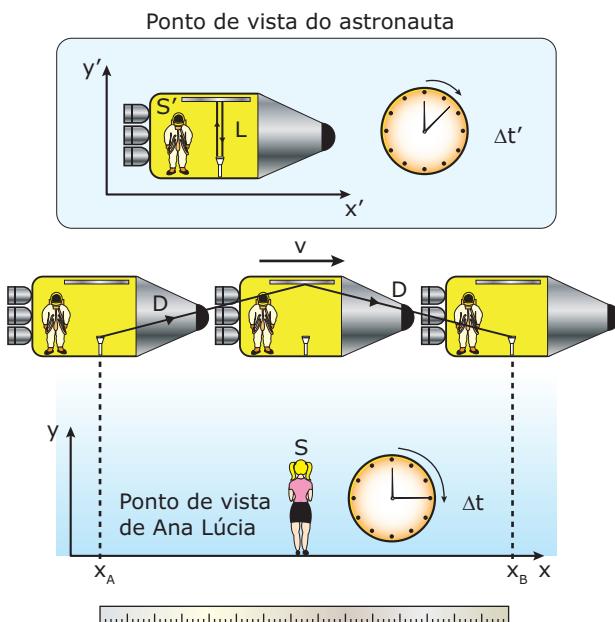



Figura 3: Diferentes trajetórias de um pulso luminoso para quem viaja na nave e para quem está na Terra. (As dimensões foram exageradas para melhor entendimento do problema).

De acordo com o 2º Postulado de Einstein, a velocidade do pulso de luz vale **c** tanto no referencial S quanto no referencial S', independentemente do quão rápido a nave possa estar. Como a distância percorrida pelo pulso é maior no referencial S, concluímos que o tempo Δt deve ser maior que o tempo $\Delta t'$. Este é chamado de tempo próprio, medido no referencial em que os dois eventos (a emissão e o retorno do pulso luminoso) ocorrem em uma mesma posição. O intervalo de tempo Δt medido em qualquer outro referencial é sempre maior que o tempo próprio. Essa expansão temporal é chamada de dilatação do tempo. Nos referenciais em que o tempo é dilatado, os dois eventos ocorrem em posições diferentes. No referencial S, observe que a emissão do pulso ocorre na posição x_A, enquanto o seu retorno se dá na posição x_B.

Na situação desse exemplo, embora tenhamos medido o tempo com uma espécie de relógio de luz, todos os outros tipos de relógio funcionam mais lentamente no interior da nave, pois o relativismo do tempo não está associado ao mecanismo do relógio usado em sua medição, mas sim à natureza física do tempo. A figura 3 mostra dois relógios analógicos, um marcando o tempo próprio dentro da nave e o outro marcando o tempo dilatado na Terra.

Agora, vamos deduzir uma equação para relacionar o tempo próprio $\Delta t'$ com o tempo dilatado Δt. O primeiro é o tempo que a luz leva para percorrer a distância vertical 2L no referencial S' (L é a altura do espelho em relação à fonte de luz). O segundo é o tempo que a luz leva para percorrer a distância diagonal 2D no referencial S. Assim:

$$2L = c\Delta t' \quad \text{e} \quad 2D = c\Delta t$$

Na figura 3, observe que cada uma das metades do caminho diagonal percorrido pela luz em S corresponde à hipotenusa de um triângulo retângulo de altura L. A base do triângulo é a distância que a nave percorre durante o intervalo de tempo $\Delta t/2$. Assim, se a velocidade da nave em relação à Terra é v, a base desse triângulo é dada por $v.\Delta t/2$. Aplicando o Teorema de Pitágoras, podemos obter o valor da hipotenusa do triângulo em função da altura e da base deste. Multiplicando o valor da hipotenusa por 2, obtemos a distância diagonal 2D:

$$2D = 2\sqrt{L^2 + (v\,\Delta t/2)^2}$$

Combinando essa expressão com as duas equações anteriores, obtemos a relação entre os tempos nos dois referenciais.

$$\Delta t = \gamma\Delta t', \text{ sendo } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

O fator γ que multiplica $\Delta t'$ indica o quanto o tempo acha-se dilatado no referencial S. Esse número é conhecido como fator de Lorentz, em homenagem ao físico holandês Hendrik Lorentz, por suas valiosas contribuições à Teoria da Relatividade.

O termo v^2/c^2 é sempre menor do que 1 (pois $v < c$) e é sempre positivo, de modo que a raiz quadrada no denominador do fator de Lorentz é menor do que 1. Por isso, $\gamma > 1$. Para velocidades ordinárias, como a de carros, aviões e foguetes, o valor de v^2/c^2 tende a zero e γ é praticamente 1. Por isso, em nosso dia a dia, não percebemos a dilatação do tempo. Foi esse um dos motivos pelo qual a relatividade do tempo demorou tanto para ser descoberta.

Quando a velocidade de um corpo é comparável à velocidade da luz, o fator γ é suficientemente maior que 1, de modo que a dilatação do tempo é perceptível. Para exemplificar esse fenômeno, considere que a nave da figura 3 se afaste da Terra com velocidade $v = 0{,}6c$. O astronauta comunica à estação de controle terrestre que ele vai descansar durante 1 hora. Na Terra, quanto tempo irá durar o descanso? A resposta não é 1 hora, pois o início e o final do descanso não ocorrem na mesma posição no referencial terrestre. Portanto, o tempo terrestre é dilatado do fator de Lorentz, que vale:

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - 0{,}6^2} = 1/0{,}8 = 1{,}25$$

Então, $\Delta t = 1{,}25.\Delta t' = 1{,}25.1\text{h} = 1{,}25$ h.

Portanto, o descanso medido na Terra é de 1,25 h.

Contração do comprimento

Um fenômeno diretamente relacionado à dilatação do tempo é a contração do comprimento. Para explicarmos esse conceito, observe a grande régua da figura 3. O comprimento da régua medido no referencial S, no qual ela se acha em repouso, é chamado de comprimento próprio L_P. Ana Lúcia pode calcular esse comprimento, usando a expressão $L_P = v.\Delta t$, em que v é a velocidade da nave, e Δt é o tempo que a nave leva para se deslocar de x_A até x_B (posições alinhadas com as extremidades da régua). De dentro da nave, o astronauta vê a Terra passando com uma velocidade $-v$ (o sinal negativo indica que o sentido de movimento da Terra é oposto ao da nave). De forma semelhante, o astronauta pode calcular o comprimento da régua através da expressão $L = v\Delta t'$. Para ele, as passagens das extremidades da régua pela nave ocorrem em uma mesma posição do seu referencial S′. Por isso, o tempo $\Delta t'$ medido por ele é menor que o tempo Δt medido por Ana Lúcia. Como consequência disso, o astronauta vê a barra contraída. É fácil mostrar que o fator de contração do comprimento vale $1/\gamma$. Assim, se a nave se move com uma velocidade $v = 0{,}6c$ (ou seja, $1/\gamma = 0{,}8$), e o comprimento próprio da régua for $L_P = 10$ m, o astronauta verá a régua com o comprimento $L = L_P(1/\gamma) = 10.0{,}8 = 8$ m.

Agora, imagine que o astronauta veja a sua nave com um comprimento de 3 m e uma altura de 2 m. Esses são os comprimentos próprios da nave, pois ela está em repouso em relação ao astronauta. Da Terra, Ana Lúcia vê a nave contraída com um comprimento $L = 3.0{,}8 = 2{,}4$ m. Como a nave não apresenta movimento na direção vertical (y), a altura da nave não é contraída. Portanto, Ana Lúcia vê a nave com a sua altura própria, de 2 m. Logo, podemos concluir que, assim como na dilatação do tempo, a contração do comprimento é percebida nos referenciais em movimento em relação ao objeto de medida.

Adição relativística de velocidades

Considere um trem que se afasta com velocidade de 60 km/h de uma estação. Se um passageiro caminhar com velocidade de 1 km/h em relação ao trem no sentido do seu movimento, alguém parado na estação verá o passageiro se afastando com a velocidade de 61 km/h. Para pequenas velocidades, o cálculo através da simples adição ou subtração das velocidades é adequado. Porém, para velocidades comparáveis à velocidade da luz, o cálculo feito desta maneira não fornece resultados corretos. Por exemplo, considere uma nave se afastando de uma estação espacial com uma velocidade $v_1 = 0{,}4c$ (c é a velocidade da luz). Dentro da nave, um elétron é emitido no mesmo sentido do movimento da nave com uma velocidade $v_2 = 0{,}8c$ em relação à nave. Qual é a velocidade do elétron em relação à estação? A adição simples das velocidades nos conduz à seguinte resposta: $0{,}4c + 0{,}8c = 1{,}2c$. Porém, essa velocidade é maior que a velocidade da luz, o que é impossível de acordo com a Teoria da Relatividade. No caso de as velocidades serem comparáveis à velocidade da luz, devemos usar a seguinte equação relativística de adição de velocidades (não vamos deduzir a equação, e tampouco você precisa memorizá-la):

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 v_2/c^2)}$$

Substituindo as velocidades do elétron e da nave nessa expressão, obtemos:

$$v = \frac{0{,}4c + 0{,}8c}{1 + (0{,}4c.0{,}8c/c^2)} = 0{,}91c$$

Agora, o resultado é possível. Um cientista na estação espacial detecta o elétron se afastando dele com uma velocidade muito alta, porém inferior à velocidade da luz.

Podemos usar a equação anterior para calcular a velocidade da luz no seguinte caso. Em vez do elétron, imagine que um pulso de luz seja disparado de dentro da nave com a velocidade $v_2 = c$ e no mesmo sentido da velocidade $v_1 = 0{,}4c$ da nave. A velocidade do pulso luminoso em relação à estação pode ser obtida substituindo-se as velocidades da nave e do pulso na equação anterior. Isso nos leva ao seguinte resultado:

$$v = \frac{0{,}4c + c}{1 + (0{,}4c.c/c^2)} = \frac{1{,}4c}{1{,}4} = c$$

Assim, a velocidade do pulso de luz em relação à estação também vale c, o que é consistente com o 2º Postulado da Teoria da Relatividade.

Por último, destacamos o fato de que a equação relativística de adição de velocidades se reduz à equação clássica quando as velocidades são pequenas. Nessas situações, o produto $v_1.v_2$ é muito menor que c^2. Por isso, o termo entre parênteses na equação relativística é praticamente zero, o denominador se iguala a 1, e a velocidade v se iguala à soma algébrica simples de v_1 e v_2.

A energia relativística

No início do século XX, os princípios da conservação da energia e da massa eram conceitos distintos. Basicamente, o Princípio da Conservação da Energia envolvia os processos mecânicos, térmicos, químicos e eletromagnéticos. De outro lado, a conservação da massa se aplicava à não modificação da massa em transformações físicas (ebulição, forjamento, etc.) e químicas (oxidação, combustão, etc.).

No desenvolvimento da Teoria da Relatividade, Einstein concluiu que a matéria em si é uma forma de energia. Com essa ideia, Einstein unificou os princípios da conservação da energia e da massa em um único conceito. De acordo com a Teoria da Relatividade, um corpo de massa m possui uma energia, que se deve a essa massa, dada pela seguinte equação:

$$E = mc^2$$

Essa energia é chamada de energia de repouso. Naturalmente, se um corpo está em movimento, além da parcela mc^2, o corpo também possuirá uma parcela de energia cinética. A energia de repouso, quando liberada, aparece na forma de energia eletromagnética. Como a velocidade da luz é muito grande e como aparece elevada ao quadrado na equação anterior, podemos verificar, por meio de cálculos simples, o gigantesco potencial energético da massa. Imagine, por exemplo, que uma massa igual a 1 kg tenha sido integralmente convertida em energia. De cordo com Einstein, essa energia possui um valor igual a $1{,}0(3 \times 10^8)^2$ joules ou $2{,}5 \times 10^{10}$ kWh. A um custo de 50 centavos o kWh, essa energia vale 12,5 bilhões de reais.

Não é simples converter grandes quantidades de massa em energia. Na natureza, parcelas ínfimas de massas atômicas são transformadas em energia. Quando a taxa de átomos mutantes é elevada, a energia gerada pode ser muito grande. É dessa forma que ocorre a produção de energia nas estrelas, nas quais núcleos leves de hidrogênio se fundem, transformando-se em núcleos de hélio (fusão nuclear). A conversão de massa em energia também explica a geração de energia nas usinas nucleares, nas quais núcleos pesados de urânio são quebrados em núcleos mais leves (fissão nuclear).

De forma inversa, a energia eletromagnética também pode ser convertida em massa. Por exemplo, a figura 4 mostra o processo de formação de pares elétron/pósitron em que dois fótons de radiação gama colidem, convertendo as suas energias nas massas das duas partículas produzidas: um elétron (e^-) e um pósitron (e^+). O pósitron (antipartícula do elétron) possui a mesma massa e carga de mesmo módulo que o elétron, tendo, contudo, carga positiva.

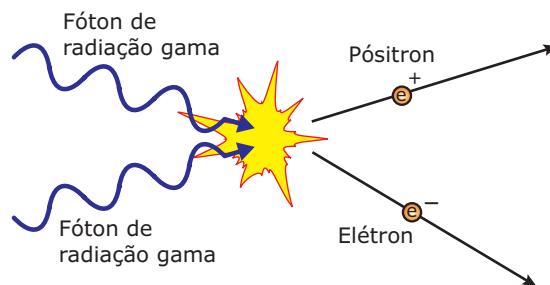



Figura 4: A produção de pares é um exemplo de conversão de energia em massa.

As massas dos fótons são nulas. As massas do elétron e do pósitron valem, cada uma, $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg. Essas massas surgem a partir das energias dos fótons, cuja soma vale 2hf ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck, e f é a frequência de cada fóton). Igualando 2hf com a energia de repouso $E = 2mc^2$ das duas partículas, obtemos para a frequência dos fótons o valor $f = 1{,}24 \times 10^{20}$ Hz. Veja que esse valor de frequência está inserido na faixa da radiação gama.

Ao efetuarmos o cálculo relativo ao processo de produção do par elétron/pósitron, igualamos a energia hf de cada fóton à energia mc^2 de cada partícula, e, por consequência, desprezamos a energia cinética E_C das partículas. Nas situações em que essa energia é expressiva, devemos efetuar os cálculos considerando a energia total, que é dada por:

$$E = E_C + mc^2$$

Para velocidades comparáveis à velocidade da luz, a energia cinética não pode ser calculada pela equação clássica $E_C = mv^2/2$. Considerando os efeitos relativísticos, é possível provar que a energia cinética de uma partícula é dada por:

$$E_C = (\gamma - 1)m.c^2$$

Substituindo essa expressão na equação anterior, obtemos uma expressão para a energia relativística total:

$$E = (\gamma - 1)mc^2 + mc^2 = \gamma.mc^2$$

Na produção do par elétron/pósitron descrito anteriormente, as velocidades das partículas são pequenas, de forma que $\gamma = 1$. Por isso, a energia total pôde ser aproximada por $E = mc^2$.

Em alguns textos sobre a Teoria da Relatividade, a quantidade de movimento de uma partícula é expressa pela equação clássica Q = mv, em que a massa é dada por $m = \gamma m_0$. Desse ponto de vista, a massa é relativística e aumenta com a velocidade. Para a partícula em repouso, $\gamma = 1$, e a sua massa vale m_0 (massa de repouso). Para a partícula em movimento, $\gamma > 1$, e a massa vale $m > m_0$. Atualmente, entende-se que a massa é uma propriedade física da matéria, tendo o mesmo valor em todos os referenciais. Nesse caso, a quantidade de movimento é dada por $Q = \gamma mv$. Quando a velocidade de uma partícula aumenta, a sua quantidade de movimento também aumenta, pois tanto v quanto o fator γ crescem. Contudo, a massa da partícula permanece constante. Você deve ficar atento, pois, em alguns exames, o conceito da massa relativística ainda é usado.

RADIOATIVIDADE

Descoberta e constituição da radioatividade

Em 1896, Antoine Becquerel descobriu acidentalmente a radioatividade, quando colocou sais de urânio dentro de uma caixa fechada, na qual também havia uma placa fotográfica. Apesar de o interior da caixa ser escuro, no dia seguinte, Becquerel verificou que a placa havia sido sensibilizada por algum tipo de radiação. Ele concluiu corretamente que o urânio tinha a propriedade de emitir espontaneamente essa radiação. Em seguida, diversos cientistas se dedicaram ao estudo da radiação emitida espontaneamente por corpos frios. Entre eles, destacam-se os nomes de Pierre e Marie Curie.

A radiação não é uma manifestação da energia dos elétrons de um átomo, mas sim de seu núcleo. A radiação é um fenômeno natural, ou artificial, em que os núcleos de certos elementos instáveis emitem três radiações básicas: alfa (α), beta (β) e gama (γ). Quando o elemento emite tais radiações, dizemos que ele sofreu decaimentos α, β e γ.

A radioatividade pode ser muito perigosa para os seres humanos, contudo, usada de forma controlada, ela possui várias aplicações, inclusive medicinais. Entre essas aplicações, temos a datação de fósseis e de minerais, por meio da medição de sua atividade radioativa, a geração de energia em usinas nucleares, por meio da fissão nuclear, e o bombardeamento de células cancerosas com radiação gama.

A figura 5 ilustra o poder de penetração das radiações α, β e γ sobre a matéria. A radiação α é facilmente bloqueada por folhas de papel e pelo corpo humano. A radiação β é mais penetrante, sendo bloqueada por metais leves, como o alumínio. A radiação γ é a mais penetrante, e pode atravessar muitos metais. Ela pode ser bloqueada por grossas placas de chumbo e por paredes de concreto.

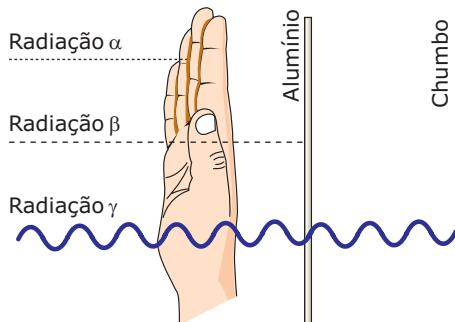



Figura 5: Poder de penetração das radiações α, β e γ na matéria.

Fazendo passar um feixe radioativo por um campo magnético, como mostrado na figura 6, os cientistas descobriram que a radiação α possui carga positiva, que a radiação β possui carga negativa e que a radiação γ é neutra. Observe que o desvio sofrido pela radiação α é menor que aquele sofrido pela radiação β. O motivo principal para a ocorrência desse fenômeno é o fato de que a massa da partícula α é muito maior que a massa da partícula β.

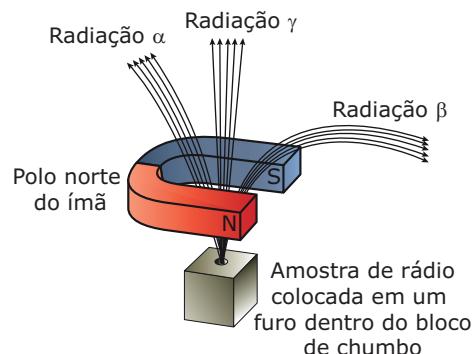



Figura 6: Experimento para determinação das cargas elétricas das radiações α, β e γ.

A partícula α é composta de dois nêutrons e de dois prótons, sendo, portanto, um núcleo do átomo de hélio. No decaimento α, um núcleo original de número atômico Z e número de massa A se transforma em um novo núcleo com número atômico Z − 2 e número de massa A − 4. A figura 7 ilustra o decaimento α do urânio 238 (Z = 92 prótons, N = 146 nêutrons e A = Z + N = 238). O resultado é o aparecimento do tório 234 (Z = 90 prótons, N = 144 nêutrons e A = 234).

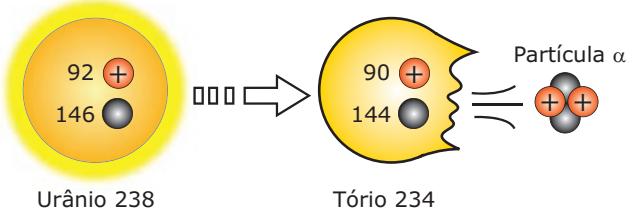



Figura 7: Decaimento alfa.

A radiação β é constituída por elétrons muito energéticos. Embora sejam provenientes do núcleo atômico, esses elétrons não se acham em seu interior antes de o decaimento ocorrer. O elétron é criado no momento da emissão, quando um nêutron se transforma em um próton e em um elétron. Nesse tipo de decaimento, o núcleo original de número atômico Z se transforma em um novo núcleo de número atômico Z + 1, sem que haja alteração do número de massa. A figura 8 ilustra o decaimento β do carbono 14 (Z = 6 prótons, N = 8 nêutrons e A = 14). O resultado é o aparecimento do nitrogênio 14 (Z = 7 prótons, N = 7 nêutrons e A = 14) e a emissão da partícula β.

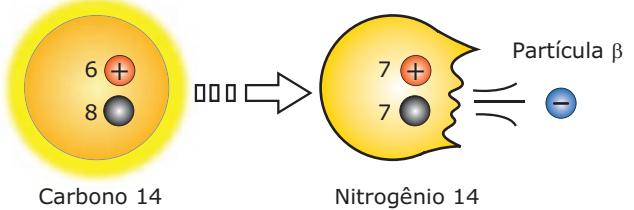



Figura 8: Decaimento beta.

O decaimento β pode ocorrer também por meio da emissão de um pósitron (que é a antipartícula do elétron). Nesse caso, um próton se transforma em um nêutron e em um pósitron. O núcleo original (Z, A) transforma-se em um núcleo de número atômico Z − 1 e número de massa A.

A radiação γ é constituída de fótons de alta energia e de alta frequência emitidos pelo núcleo atômico. Esses fótons são emitidos em decorrência de os prótons e os nêutrons sofrerem transições entre os níveis de energia existentes no núcleo. Esses níveis são semelhantes aos níveis de energia dos elétrons. Porém, as diferenças de energia existentes entre níveis nucleares são muito maiores do que aquelas existentes entre os níveis eletrônicos. Por isso, os fótons emitidos pelo núcleo são muito mais energéticos (de frequências maiores) que os fótons provenientes de transições envolvendo elétrons.

Causa da radioatividade

No interior do núcleo, os prótons se repelem mutuamente devido às forças elétricas. Por isso, alguns núcleos não são estáveis e se desintegram em núcleos menores por meio dos decaimentos radioativos. Os núcleos estáveis não se rompem porque existe uma interação atrativa entre prótons e nêutrons capaz de superar a repulsão elétrica entre os prótons. Essa interação é uma manifestação da chamada força nuclear forte.

A interação atrativa nuclear se manifesta de forma igual entre prótons e nêutrons, não dependendo da carga elétrica. Porém, essa força é de curto alcance, manifestando-se apenas entre partículas muito próximas. Por isso, para compensar a repulsão elétrica, os núcleos mais pesados devem possuir um número de nêutrons sensivelmente maior que o número de prótons. Todavia, quando o núcleo é muito grande, a instabilidade é inevitável. Átomos com $Z \geq 83$ não são estáveis. Alguns isótopos com $Z < 82$ também podem não ser estáveis. Nesses casos, os núcleos sofrem uma sequência de decaimentos α e β (acompanhados de decaimentos γ) que o transformam em um núcleo estável. A figura 9 mostra a sequência que leva o urânio 238 ($Z = 92$ e $N = 146$) ao elemento chumbo 206 ($Z = 82$ e $N = 124$). Observe que a parte inferior da sequência pode ocorrer por meio de caminhos alternativos.

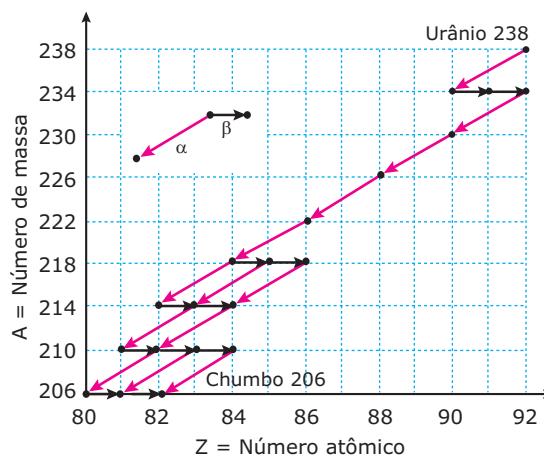



Figura 9: Transformação do U-238 em Pb-206 por meio de vários decaimentos α (diagonal) e β (horizontal).

Tempo de meia-vida

O tempo de meia-vida é o tempo necessário para que uma amostra radioativa tenha a metade dos seus isótopos transformados em outros núcleos. Como a taxa de emissão de partículas (α ou β) depende diretamente do número de núcleos radioativos, o período de meia-vida também é igual ao tempo para que a atividade radioativa da amostra seja reduzida à metade. O tempo de meia-vida é uma propriedade de cada isótopo radioativo, podendo variar de milionésimos de segundo a bilhões de anos, dependendo do elemento. Na tabela a seguir, indicamos os períodos de meia-vida de alguns elementos. Por exemplo, o rádio 226 possui tempo de meia-vida de 1 620 anos. Isso significa que uma amostra cristalina de 100 g de rádio terá a metade dessa massa transformada em outro elemento depois de 1 620 anos, restando 50 g de rádio. Transcorridos mais 1 620 anos, restarão 25 g de rádio, e assim por diante.

Tempo de meia-vida de alguns elementos

Elemento	Isótopo	Meia-vida
Polônio	214	0,001 s
	218	3 min
	210	138 dias
Potássio	42	12,4 horas
Iodo	131	8 dias
Cobalto	60	5,27 anos
Urânio	235	710 milhões de anos
	238	4,5 bilhões de anos
Carbono	14	5 730 anos
Rádio	226	1 620 anos

O gráfico apresentado na figura a seguir mostra a evolução da massa de rádio em função do tempo. Podemos usar esse gráfico para calcular a idade de um mineral. Por exemplo, se a análise química revelar que um mineral é constituído de 6,25% de rádio 226 e 93,75% de chumbo 206, significa que foram decorridos 4 períodos de meia-vida desde a formação do mineral puro. Portanto, como a meia-vida do rádio 226 é de 1 620 anos, concluímos que a idade do mineral é de 4.1 620 anos, ou seja, 6 480 anos.

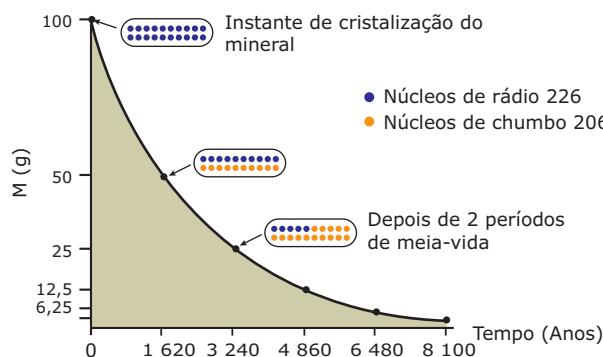
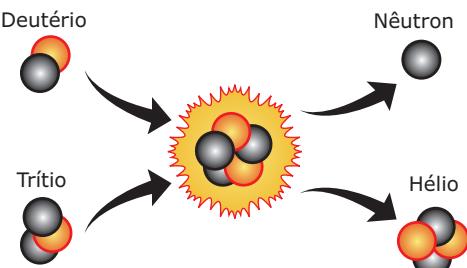
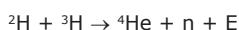



Figura 10: Evolução da massa de uma amostra de rádio 226.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A tabela a seguir fornece o valor das energias de repouso de algumas partículas elementares e de alguns núcleos leves, isto é, a energia que se deve exclusivamente às suas massas. O deutério e o trítio são isótopos do hidrogênio.

Partícula	Símbolo	Energia de repouso (MeV)
Próton	P^+	938,280
Nêutron	n	939,573
Deutério	^2H ou d	1 875,628
Trítio	^3H ou t	2 808,944
Hélio	He	3 727,409

A) Determinar a energia de ligação do deutério.

B) Em uma das reações de fusão nuclear no Sol, deutério e trítio se fundem em hélio, com a emissão de um nêutron, como mostra a figura a seguir. Calcular a energia gerada nessa reação.

Resolução:

A) O deutério é um isótopo do hidrogênio constituído de um próton e de um nêutron ligados. A soma das energias de repouso do próton e do nêutron não ligados vale 938,280 + 939,573 = 1 877,853 MeV. Observe que esse valor é maior do que a energia de repouso do deutério, que vale 1 875,628 MeV. A diferença entre essa energia e a soma anterior é 1 875,628 – 1 877,853 = –2,225 MeV. Essa é a energia de ligação do deutério, valor confirmado em experiências realizadas no laboratório.

B) A equação da reação de fusão é a seguinte:

$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + E$$

Nessa reação, E representa a energia liberada. A soma das energias de repouso do deutério e do trítio vale 1 875,628 + 2 808,944 = 4 684,572 MeV. Observe que essa soma é maior que a soma das energias de repouso do hélio e do nêutron, que vale 3 727,409 + 939,573 = 4 666,982 MeV. A diferença entre a soma das energias de repouso do deutério e do trítio e da soma das energias do hélio e do nêutron é 4 684,572 − 4 666,982 = 17,59 MeV. Esse valor é a energia E liberada na reação nuclear de fusão. Devido à emissão dessa energia, ocorre uma diminuição da massa de repouso do Sol. À medida que o Sol emite energia, sua massa diminui.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

(UEPB–2010)

Instrução: Os exercícios **01** e **02** referem-se ao texto a seguir.

A relatividade proposta por Galileu e Newton, na Física Clássica, é reinterpretada pela Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e não inerciais).

01. Acerca do assunto tratado no texto anterior, podemos afirmar:

I. A Teoria da Relatividade afirma que a velocidade da luz não depende do sistema de referência.

II. Para a Teoria da Relatividade, quando o espaço dilata, o tempo contrai, enquanto que, para a física newtoniana, o espaço e o tempo sempre se mantêm absolutos.

III. A Mecânica Clássica e a Teoria da Relatividade não limitam a velocidade que uma partícula pode adquirir.

IV. Na relatividade de Galileu e Newton, o tempo não depende do referencial em que é medido, ou seja, é absoluto.

Após a análise feita, é(são) **CORRETA(S)** apenas a(s) proposição(ões)

A) II e III.

B) I e IV.

C) I, II e IV.

D) III.

E) III e IV.

02. (UEPB–2010) Ainda acerca do assunto tratado no texto anterior, resolva a seguinte situação-problema: Considere uma situação fictícia, que se configura como uma exemplificação da relatividade do tempo.

Um grupo de astronautas decide viajar numa nave espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos no relógio da nave. Quando retornam à Terra, verifica-se que aqui se passaram alguns anos.

Considerando que c é a velocidade da luz no vácuo e que a velocidade média da nave é 0,8c, é **CORRETO** afirmar que, ao retornarem à Terra, se passaram

A) 20 anos.

B) 10 anos.

C) 30 anos.

D) 12 anos.

E) 6 anos.

03. (PUC RS–2007) Considere as informações a seguir.

A energia que as estrelas e o Sol irradiam por bilhões de anos nasce da reação nuclear conhecida como fusão. Esta acontece no interior das estrelas, sob altíssimas temperaturas. De uma forma simplificada, podemos dizer que dois dêuterons (núcleos do deutério, ou hidrogênio pesado, formado por um próton e um nêutron) se unem (fundem) dando origem a um núcleo de hélio. A relação $\Delta E = mc^2$, que expressa a relação entre massa e energia, pode ser lida como: "à cada variação ΔE de energia corresponde uma variação Δm de massa e vice-versa". Por outro lado, c representa o valor da velocidade da luz no vácuo. Considerando a massa de cada dêuteron como m, e a massa do núcleo de hélio como 1,99 m, é **CORRETO** afirmar que, no processo de fusão de dois dêuterons em um núcleo de hélio,

A) houve ganho de massa.

B) a diferença de massa foi 0,99 m.

C) a energia liberada na fusão aumenta a massa total do Sol.

D) a energia liberada na fusão não altera a massa total do Sol.

E) a energia liberada na fusão diminui a massa total do Sol.

04. (PUC-Campinas-SP) Protestos de várias entidades ecológicas têm alertado sobre os danos ambientais causados pelas experiências nucleares francesas no Atol de Mururoa. Isótopos radioativos prejudiciais aos seres vivos, como ^{90}Sr, formam o chamado lixo nuclear desses experimentos.

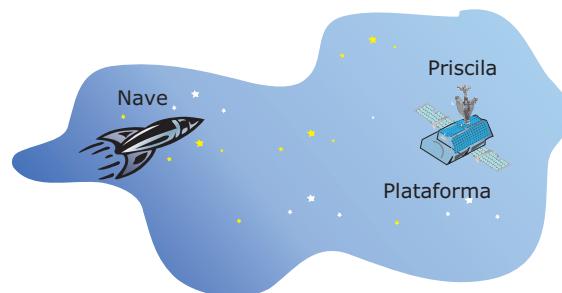
Quantos anos são necessários para que uma amostra de ^{90}Sr, lançada no ar, se reduza a 25% da massa inicial? Dado: meia-vida do ^{90}Sr = 28,5 anos.

A) 28,5
B) 57,0
C) 85,5
D) 99,7
E) 114

05. (UFMG) O principal processo de produção de energia na superfície do Sol resulta da fusão de átomos de hidrogênio para formar átomos de hélio. De uma forma bem simplificada, esse processo pode ser descrito como a fusão de 4 átomos de hidrogênio ($m_H = 1,67 \times 10^{-27}$ kg) para formar um átomo de hélio ($m_{He} = 6,65 \times 10^{-27}$ kg). Suponha que ocorram 10^{38} reações desse tipo a cada segundo.

A) Considerando essas informações, **EXPLIQUE** como essa reação pode produzir energia.

B) Com base nas suposições feitas, **CALCULE** a quantidade de energia liberada a cada segundo.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFMA–2007) Analise as proposições a seguir sobre os Princípios da Relatividade Restrita. Em seguida, marque a alternativa que indica as informações **VERDADEIRAS**.

I. A Teoria da Relatividade Restrita é válida para qualquer tipo de referencial.

II. A velocidade da luz no vácuo é constante, pois independe do movimento da fonte ou do referencial do observador.

III. A Teoria da Relatividade Restrita só é válida para velocidades muito menores que a velocidade da luz.

IV. A simultaneidade é relativa.

V. A Teoria da Relatividade Restrita diz que existe uma equivalência entre massa e energia, dada pela equação $E = mc^2$.

A) I – II – IV

B) II – IV – V

C) II – III – V

D) II – III – IV

E) I – IV – V

02. (CEFET-MG–2009) Einstein deixou um grande legado para a humanidade ao apresentar de forma brilhante a Teoria da Relatividade Restrita. Segundo essa teoria, para uma partícula que se move com velocidade próxima à da luz, grandezas físicas como tempo, espaço e massa, respectivamente,

A) dilata, dilata, diminui.

B) dilata, contrai, diminui.

C) contrai, contrai, diminui.

D) contrai, dilata, aumenta.

E) dilata, contrai, aumenta.

03. (UFMG) Observe esta figura.

Paulo Sérgio, viajando em sua nave, aproxima-se de uma plataforma espacial, com velocidade de 0,7c, em que c é a velocidade da luz. Para se comunicar com Paulo Sérgio, Priscila, que está na plataforma, envia um pulso luminoso em direção à nave. Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que a velocidade do pulso medida por Paulo Sérgio é de

A) 0,7c. B) 1,0c. C) 0,3c. D) 1,7c.

04. (UFMG–2008) Suponha que, no futuro, uma base avançada seja construída em Marte.

Suponha, também, que uma nave espacial está viajando em direção à Terra, com velocidade constante igual à metade da velocidade da luz.

Quando essa nave passa por Marte, dois sinais de rádio são emitidos em direção à Terra – um pela base e outro pela nave. Ambos são refletidos pela Terra e, posteriormente, detectados na base em Marte.

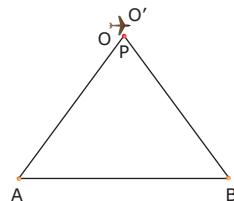
Sejam t_B e t_N os intervalos de tempo total de viagem dos sinais emitidos, respectivamente, pela base e pela nave, desde a emissão até a detecção de cada um deles pela base em Marte.

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $t_N = \frac{1}{2}t_B$.

B) $t_N = \frac{2}{3}t_B$.

C) $t_N = \frac{5}{6}t_B$.

D) $t_N = t_B$.

05. (UEL-PR–2008) Os múons são partículas da família dos léptons, originados pela desintegração de partículas píons em altitudes elevadas na atmosfera terrestre, usualmente a alguns milhares de metros acima do nível do mar. Um múon típico, movendo-se com velocidade de 0,998c, realiza um percurso de aproximadamente 600 m durante seu tempo de vida média de 2×10^{-6} s. Contudo, o tempo de vida média desse múon, medido por um observador localizado no sistema de referência da Terra, é de 30×10^{-6} s. Considere a velocidade da luz $c = 3 \times 10^8$ m/s. Com base nos conhecimentos sobre a Teoria da Relatividade, analise as seguintes afirmativas:

I. Essa discrepância de valores é explicada pelo aumento do tempo de vida média da partícula no sistema de referência da Terra, por um fator de Lorentz no valor aproximado de 15 para a velocidade dada.

II. No sistema de referência da Terra, um múon com essa velocidade percorre cerca de 9 000 m.

III. No sistema de referência da Terra, um múon com essa velocidade percorre cerca de 3 000 m.

IV. Observações e medidas desse tipo confirmam previsões relativísticas.

Com base nos conhecimentos em Física, assinale a alternativa que contém todas as afirmativas **CORRETAS.**

A) I e IV

B) II e III

C) III e IV

D) I, II e III

E) I, II e IV

06. (Unirio-RJ–2006) Duas pessoas, A e B, têm uma lanterna cada uma. Em certo instante, elas ligam suas lanternas e a luz emitida é vista por dois observadores: O e O’. O primeiro encontra-se parado e equidistante delas, enquanto o segundo se encontra dentro de um avião que viaja horizontalmente com velocidade v. No instante em que as lanternas são ligadas, eles encontram-se no mesmo ponto P, conforme a figura.

Algum tempo depois, os observadores comunicam-se e O faz a seguinte afirmação: “A e B acenderam a lanterna ao mesmo tempo”. Quando O’ ouve esta afirmação, se surpreende e diz que “B acendeu a lanterna antes de A”.

Em relação às afirmações relativas a O e O’, pode-se afirmar, rigorosamente, que

A) somente o observador O’ está certo.

B) os dois observadores estão errados.

C) somente o observador O está certo.

D) os dois observadores estão certos.

E) somente um deles está errado.

07. (UFC–2010) Em relação a um sistema de referência em repouso, dois elétrons movem-se em sentidos opostos ao longo da mesma reta, com velocidades de módulos iguais a c/2. Determine a velocidade relativa de aproximação entre os elétrons. Em seguida assinale a alternativa que apresenta **CORRETAMENTE** essa velocidade.

A) c/2

B) 3c/4

C) 3c/5

D) 4c/5

E) c

FÍSICA

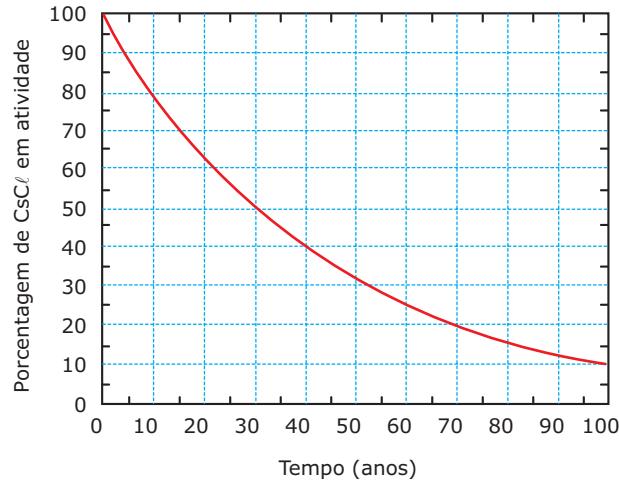
08. (UFPel-RS–2007) Considere as afirmativas a seguir.

I. O tempo transcorre da mesma maneira em qualquer referencial inercial, independentemente da sua velocidade.

II. O comprimento dos corpos diminui na direção do movimento.

III. Quando a velocidade de um corpo tende à velocidade da luz, sua massa tende ao infinito.

De acordo com seus conhecimentos sobre Física Moderna e as informações dadas, está(ão) **CORRETA(S)** a(s) afirmativa(s)

A) I e III.
B) I e II.
C) II e III.
D) I, II e III.
E) II.

09. (CEFET-MG–2009) Considere as informações a seguir.

O elemento radioativo césio 137 tem meia-vida de 30 anos. Meia-vida é o intervalo de tempo após o qual o número de átomos radioativos existentes, em certa amostra, fica reduzido à metade de seu valor inicial.

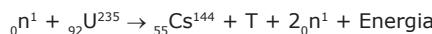
Uma amostra de 120 átomos desse material estará reduzida a 15 átomos após um período de tempo, em anos, igual a

A) 60.
B) 90.
C) 120.
D) 180.
E) 240.

10. (UFG–2008) Em 2007, completaram-se 20 anos do acidente radiológico com o césio 137 em Goiânia. No ano do acidente, 20 g de cloreto de césio 137, por total desconhecimento do conteúdo e de suas consequências, foram liberados a céu aberto, provocando um dos maiores acidentes radiológicos de que se tem notícia. Após a tragédia, o dejeto radioativo foi armazenado num local próximo à cidade de Abadia de Goiás. O gráfico a seguir mostra a curva de decaimento radioativo do césio.

A partir do ano de 2007 e com base nos dados fornecidos, a quantidade em gramas do sal $^{137}CsC\ell$ nos resíduos, após o tempo equivalente a uma meia-vida do césio 137, será, aproximadamente,

A) 5,0.
B) 6,4.
C) 8,0.
D) 10,0.
E) 12,8.

11. (UEG–2007) Com base nos conhecimentos atuais da Física, é **INCORRETO** afirmar:

A) A velocidade da luz é um invariante físico.

B) A energia do Sol tem origem na fusão de átomos de hidrogênio.

C) É possível gerar energia elétrica em grande quantidade a partir do efeito fotoelétrico.

D) Nos reatores nucleares, a diferença de potencial elétrico é criada no processo de desintegração dos átomos radioativos.

12. (UFRGS–2007) O PET (*Positron Emission Tomography* ou tomografia por emissão de pósitron) é uma técnica de diagnóstico por imagens que permite mapear a atividade cerebral por meio de radiações eletromagnéticas emitidas pelo cérebro. Para a realização do exame, o paciente ingere uma solução de glicose contendo isótopo radioativo flúor-18, que tem meia-vida de 110 minutos e decai por emissão de pósitron. Essa solução é absorvida rapidamente pelas áreas cerebrais em maior atividade. Os pósitrons emitidos pelos núcleos de flúor-18, ao encontrarem elétrons das vizinhanças, provocam, por aniquilação de pares, a emissão de fótons de alta energia. Esses fótons são empregados para produzir uma imagem do cérebro em funcionamento.

Supondo-se que não haja eliminação da solução pelo organismo, que porcentagem da quantidade de flúor-18 ingerido ainda permanece presente no paciente 5 horas e 30 minutos após a ingestão?

A) 0,00%
B) 12,50%
C) 33,33%
D) 66,66%
E) 87,50%

13. (UERJ) O reator atômico instalado no município de Angra dos Reis é do tipo PWR (reator de água pressurizada). O seu princípio básico consiste em obter energia através do fenômeno da fissão nuclear, em que ocorre a ruptura de núcleos pesados em outros mais leves, liberando grande quantidade de energia. Esse fenômeno pode ser representado pela seguinte equação nuclear:

$$_0n^1 + {}_{92}U^{235} \rightarrow {}_{55}Cs^{144} + T + 2\,_0n^1 + \text{Energia}$$

Os números atômicos e de massa do elemento T estão, respectivamente, indicados na seguinte alternativa:

A) 27 e 91

B) 37 e 90

C) 39 e 92

D) 43 e 93

14. (FUVEST-SP) Na reação de fusão nuclear representada por:

$$_1H^2 + {}_1H^3 \rightarrow T + n + \text{Energia}$$

Ocorre a liberação de um nêutron (n). A espécie T deve ter

A) 2 prótons e 2 nêutrons.

B) 2 prótons e 3 nêutrons.

C) 2 prótons e 5 nêutrons.

D) 2 prótons e 3 elétrons.

E) 4 prótons e 3 elétrons.

15. (UFC–2007) O núcleo de um determinado elemento A, constituído por dois prótons e dois nêutrons, tem massa $m_A \approx 6{,}691 \times 10^{-27}$ kg. Medidas experimentais mostram que a soma da massa dos dois prótons, $m_P \approx 3{,}345 \times 10^{-27}$ kg, com a massa dos dois nêutrons, $m_N \approx 3{,}350 \times 10^{-27}$ kg, não é igual à massa do núcleo. Isso significa que existe uma energia mínima necessária para separar os constituintes do núcleo do elemento A, denominada aqui de energia de ligação E_L.

Dados: constante de Planck $h = 6 \times 10^{-34}$J.s;

velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^8$ m/s.

A) **DETERMINE** a energia de ligação para separar prótons e nêutrons em um núcleo do elemento A.

B) No caso de ser possível separar os constituintes do núcleo do elemento A, incidindo fótons de uma radiação eletromagnética de frequência $f = 1{,}2 \times 10^{15}$ Hz, **DETERMINE** o número de fótons necessários para que isso ocorra.

16. (UFMG) Após ler uma série de reportagens sobre o acidente com césio 137 que aconteceu em Goiânia, em 1987, Tomás fez uma série de anotações sobre a emissão de radiação por césio:

- O césio 137 transforma-se em bário 137, emitindo uma radiação beta.
- O bário 137, assim produzido, está em um estado excitado e passa para um estado de menor energia, emitindo radiação gama.
- A meia-vida do césio 137 é de 30,2 anos e sua massa atômica é de 136,90707 u, em que u é a unidade de massa atômica ($1 \text{ u} = 1{,}6605402 \times 10^{-27}$ kg).
- O bário 137 tem massa de 136,90581 u e a partícula beta, uma massa de repouso de 0,00055 u.

A) Tomás concluiu que, após 60,4 anos, todo o césio radioativo do acidente terá se transformado em bário. Essa conclusão é verdadeira ou falsa? **JUSTIFIQUE** sua resposta.

B) O produto final do decaimento do césio 137 é o bário 137. A energia liberada por átomo, nesse processo, é da ordem de 10^6 eV, ou seja, 10^{-13} J. **EXPLIQUE** a origem dessa energia.

C) Nesse processo, que radiação, a beta ou a gama, tem maior velocidade? **JUSTIFIQUE** sua resposta.

SEÇÃO ENEM

01. (Enem-2006) O funcionamento de uma usina núcleoelétricas típica baseia-se na liberação de energia resultante da divisão do núcleo de urânio em núcleos de menor massa, processo conhecido como fissão nuclear. Nesse processo, utiliza-se uma mistura de diferentes átomos de urânio, de forma a proporcionar uma concentração de apenas 4% de material físsil. Em bombas atômicas, são utilizadas concentrações acima de 20% de urânio físsil, cuja obtenção é trabalhosa, pois, na natureza, predomina o urânio não físsil. Em grande parte do armamento nuclear hoje existente, utiliza-se, então, como alternativa, o plutônio, material físsil produzido por reações nucleares no interior do reator das usinas núcleoelétricas. Considerando-se essas informações, é correto afirmar que

A) a disponibilidade do urânio na natureza está ameaçada devido a sua utilização em armas nucleares.

B) a proibição de se instalarem novas usinas núcleoelétricas não causará impacto na oferta mundial de energia.

C) a existência de usinas núcleoelétricas possibilita que um de seus subprodutos seja utilizado como material bélico.

D) a obtenção de grandes concentrações de urânio físsil é viabilizada em usinas núcleoelétricas.

E) a baixa concentração de urânio físsil em usinas núcleoelétricas impossibilita o desenvolvimento energético.

02. (Enem–2005) Um problema ainda não resolvido da geração nuclear de eletricidade é a destinação dos rejeitos radiativos, o chamado "lixo atômico". Os rejeitos mais ativos ficam por um período em piscinas de aço inoxidável nas próprias usinas antes de ser, como os demais rejeitos, acondicionados em tambores que são dispostos em áreas cercadas ou encerrados em depósitos subterrâneos secos, como antigas minas de sal. A complexidade do problema do lixo atômico, comparativamente a outros lixos com substâncias tóxicas, se deve ao fato de

A) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, em um processo que não tem como ser interrompido artificialmente.

B) acumular-se em quantidades bem maiores do que o lixo industrial convencional, faltando assim locais para reunir tanto material.

C) ser constituído de materiais orgânicos que podem contaminar muitas espécies vivas, incluindo os próprios seres humanos.

D) exalar continuamente gases venenosos, que tornariam o ar irrespirável por milhares de anos.

E) emitir radiações e gases que podem destruir a camada de ozônio e agravar o efeito estufa.

03. (Enem–2004) O debate em torno do uso da energia nuclear para produção de eletricidade permanece atual. Em um encontro internacional para a discussão desse tema, foram colocados os seguintes argumentos:

I. Uma grande vantagem das usinas nucleares é o fato de não contribuírem para o aumento do efeito estufa, uma vez que o urânio, utilizado como "combustível", não é queimado, mas sofre fissão.

II. Ainda que sejam raros os acidentes com usinas nucleares, seus efeitos podem ser tão graves que essa alternativa de geração de eletricidade não nos permite ficar tranquilos.

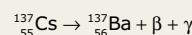
A respeito desses argumentos, pode-se afirmar que

A) o primeiro é válido e o segundo não é, já que nunca ocorreram acidentes com usinas nucleares.

B) o segundo é válido e o primeiro não é, pois de fato há queima de combustível na geração nuclear de eletricidade.

C) o segundo é valido e o primeiro é irrelevante, pois nenhuma forma de gerar eletricidade produz gases do efeito estufa.

D) ambos são válidos para se compararem vantagens e riscos na opção por essa forma de geração de energia.

E) ambos são irrelevantes, pois a opção pela energia nuclear está se tornando uma necessidade inquestionável.

GABARITO

Fixação

01. C

02. B

03. E

04. B

05. A) A massa dos 4 átomos de hidrogênio é um pouco maior que a massa do hélio. A diferença entre essas massas (Δm) é convertida em energia, segundo a equação $E = \Delta m.c^2$, em que c é a velocidade da luz.

B) $2,7 \times 10^{26}$ J/s

Propostos

01. B	04. D	07. D	10. B	13. B
02. E	05. E	08. C	11. C	14. A
03. B	06. D	09. B	12. B	

15. A) $E_L = 3,6 \times 10^{-13}$ J

B) 5×10^5 fótons

16. A) Falsa. O intervalo de tempo de 60,4 anos corresponde a dois tempos de meia-vida do césio 137. Assim, após 60,4 anos, ainda restarão 25% da massa inicial de césio.

B) O decaimento do césio radioativo pode ser expresso pela equação:

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \beta + \gamma$$

A energia liberada, fóton de radiação γ, deve-se ao fato de a massa do césio ser maior que a soma da massa do bário com a massa da partícula β. A diferença entre essas massas (Δm) é convertida em energia, segundo a equação $E = \Delta m.c^2$, em que c é a velocidade da luz.

C) A radiação gama (γ) é constituída de fótons de alta energia e viaja na velocidade da luz, superior, portanto, à velocidade da radiação beta (β), constituída de elétrons.

Seção Enem

01. C

02. A

03. D